



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Equilibrado de líneas de montaje de productos voluminosos

Gonzalo Camps, Albert Corominas, Rafael Pastor.

EOLI – Enginyeria d'Organització i Logística Industrial

IOC-DT-P-2010-03

Juny 2010

**Institut d'Organització i Control
de Sistemes Industrials**



EQUILIBRADO DE LÍNEAS DE MONTAJE DE PRODUCTOS VOLUMINOSOS

G. Camps, A. Corominas y R. Pastor

Junio de 2010

Índice

1. Orígenes	2
2. Definición de línea de montaje y algunos aspectos	2
3. Terminología básica	3
4. Enunciado del problema original de líneas de montaje	5
5. Productos voluminosos y cadenas de montaje	7
6. Formalización del problema de productos voluminosos	8
7. Características de los problemas descritos en las referencias	11
8. Contribución de las referencias al problema de productos voluminosos	13
9. Enunciado del problema de productos voluminosos	15
10. Modelo matemático propuesto para el problema de productos voluminosos. Caso de Müller-Hannemann y Weihe (2006).	17
11. Juegos de datos.	20

Referencias	22
-------------	----

Apéndices

A1. Referencias sobre líneas mixtas	23
A2. Referencias sobre líneas multiproducto	27
A3. Referencias sobre líneas monoproducción	27
A4. Referencias sobre movimiento de la línea continuo	30
A5. Referencias sobre movimiento de la línea intermitente	31
A6. Referencias sobre disposición de la línea en forma de U	32
A7. Referencias sobre el uso de ambos lados de la línea	32
A8. Referencias sobre tiempos de tarea estocásticos	33
A9. Referencias sobre tiempos de tarea dinámicos	34
A10. Referencias sobre restricciones de asignación de tareas	35
A11. Referencias sobre réplica de líneas, estaciones o tareas	35
A12. Referencias sobre almacenes intermedios de producto en curso	36
A13. Referencias sobre factores humanos y líneas de montaje	36
A14. Referencias sobre desensamblaje de productos	36
A15. Referencias sobre datos de placas de circuito impreso	38

Agradecimiento: Supported by the Spanish Ministry of Education and Science under project DPI2007-61905; co-funded by the ERDF

1. Orígenes

Erel y Sarin (1998) afirman que “el desarrollo del primer ejemplo real de una línea de montaje se atribuye a Henry Ford, quien desarrolló una línea de este estilo en 1913”. Boysen et al. (2007a) y Boysen et al. (2007b) tras comentar que “inicialmente las cadenas de ensamblaje se diseñaron para la fabricación en masa de productos estandarizados, siendo eficientes en costes y explotando una alta especialización de la mano de obra y los efectos de aprendizaje asociados”, señalan que “desde la época de Henry Ford y el famoso modelo T, los requerimientos de producto y, por tanto de los sistemas de producción, han cambiado drásticamente”, poniendo de manifiesto la importancia de Henry Ford y de su contribución en lo concerniente a líneas de montaje.

Ghosh y Gagnon (1989) señalan que el inicio del interés por el estudio de las cadenas de montaje desde el punto de vista académico, teórico, se produjo a partir de la publicación de Helgeson et al. (1954), en la que se plantea un análisis del problema de equilibrado de líneas de montaje. Otros (Roberts y Villa, 1970; Reeve y Thomas, 1973) incluyen entre las referencias de sus artículos a Bryton (1954), situándolo, en consecuencia, entre los primeros en tratar la cuestión, algunos de los cuales (Sphicas y Silverman, 1976; Carter y Silverman, 1984) no dudan en decir que ése fue el punto de partida. Sin embargo, no son pocos los autores (Arcus, 1965; Buxey et al., 1973; Vrat y Virani, 1976; Johnson, 1981; Sarker y Shantikumar, 1983; Baybars, 1986) que indican que Salveson (1955) ocupa este primer lugar, al tratarse del primer caso en que se propone una formulación matemática.

2. Definición de línea de montaje y algunos aspectos

Una cadena de ensamblaje consiste en cierto número de estaciones de trabajo dispuestas a lo largo de una cinta transportadora o de un sistema mecánico similar para el manejo de material. Las unidades van pasando por la línea, moviéndose de estación en estación. En cada estación se realizan repetidamente determinadas operaciones teniendo en cuenta el tiempo de ciclo, es decir, el tiempo máximo o promedio disponible para cada ciclo de trabajo (Becker y Scholl, 2006).

Aún en la actualidad son típicas en la fabricación industrial de grandes cantidades de productos estandarizados (Becker y Scholl, 2006), razón por la cual fueron desarrolladas originalmente, buscando la eficiencia en costes, aprovechando la alta especialización de la mano de obra y los efectos de aprendizaje asociados (Boysen et al., 2007b). No obstante, también están adquiriendo relevancia en la obtención de pequeños lotes de unidades personalizadas (Becker y Scholl, 2006), debido al acortamiento de los ciclos de vida de los productos y al rápido progreso de las tecnologías de manufactura (Rekiek et al., 2002).

Su implantación como parte integrante de un sistema productivo ha sido siempre un problema de gran envergadura en ingeniería industrial y su importancia ha ido creciendo como resultado de la globalización de la competencia, del rápido progreso de las tecnologías de manufactura, del acortamiento de los ciclos de vida de los productos y de la elevada automatización (Rekiek et al., 2002). El hecho de que la instalación de una cadena de ensamblaje sea una decisión a largo plazo y requiera grandes inversiones de capital hace necesario que el sistema se diseñe y equilibre para que funcione del modo más eficiente posible (Becker y Scholl, 2006).

3. Terminología básica

Una *tarea* es cada una de las unidades elementales (indivisibles) en que se fragmenta el trabajo total que hay que realizar sobre una unidad de producto para convertirla en un producto acabado. El tiempo necesario para concluir la tarea se denomina *tiempo de tarea* o *tiempo de proceso* y principalmente puede considerarse *determinista* (fijo, siempre el mismo), *estocástico* (dependiente de una variabilidad natural asociada a todos los procesos) o *dinámico* (dependiente de los efectos de aprendizaje de las tareas), según las características de la línea; básicamente, según si la operación de la línea es *automática* (quienes hacen las tareas son máquinas o robots) o *manual* (quienes hacen las tareas son personas).

Las tareas, satisfaciendo las *incompatibilidades* existentes entre ellas (imposibilidad de asignarlas a una misma estación por cierto motivo) y las relaciones de precedencia, se asignan a *estaciones*. Éstas son *abiertas* si se permite que los operarios de las estaciones adyacentes traspasen sus límites en caso de que necesiten, extraordinariamente, completar tareas. Este fenómeno se conoce como *solapamiento de estaciones*. Por el contrario, se llaman *cerradas* si no se autoriza ir más allá de los confines de la propia estación, aún cuando se tuvieran que terminar tareas y hubiera que dejarlas incompletas.

Se dice que una estación está *bloqueada* cuando no puede empezar a procesar la siguiente unidad de producto, a pesar de haber finalizado las tareas sobre la unidad en curso, porque no le es posible transferir dicha unidad en curso a la siguiente estación. Se dice que una estación está *desocupada* cuando no está procesando ninguna unidad de producto porque no le ha llegado.

El conjunto de todas las estaciones, unidas por medio de sistemas mecánicos que garantizan el avance de las unidades de producto hacia adelante, compone la *línea de montaje*. Este avance es *continuo*, si el desplazamiento afecta sin interrupción y simultáneamente a todas las unidades, o *intermitente*, si afecta interrumpidamente a todas las unidades (ya sea a la vez, caso *síncrono*, o a cada unidad a medida que se van completando las tareas sobre ella, caso *asíncrono*).

El conjunto de tareas que se llevan a cabo en una estación recibe el nombre de *carga de estación* y el tiempo que se tarda en finalizarlas todas es el *tiempo de estación*. Este tiempo, salvo que se acepte la posibilidad de terminar unidades de producto fuera de la línea, no debe superar en ningún caso el *tiempo de ciclo*, tiempo máximo del cual se dispone en una estación para acabar las tareas que le han sido asignadas. Si el tiempo de estación es menor que el tiempo de ciclo, la diferencia es el *tiempo libre*.

La *tasa de producción* es el número de unidades de producto acabado que se desea obtener por unidad de tiempo y corresponde exactamente al inverso del tiempo de ciclo. Cuanto mayor sea la tasa de producción que se desea obtener, menor será el tiempo de ciclo y viceversa.

No obstante, esta tasa de producción está condicionada por la mayor de las cargas de estación (es decir, la estación más lenta, *cuello de botella*). Ello puede obligar a recurrir a la *paralelización de líneas* (instalación de dos o más cadenas de ensamblaje idénticas o no), la *paralelización de estaciones* (réplica de una o más estaciones de la línea) o la *paralelización de tareas* (asignación de más recursos para disminuir el tiempo de proceso de cierta(s) tarea(s) de una o de varias estaciones de la línea) para superar la limitación sobre las unidades producibles, fijándola al nivel deseado, a expensas de una mayor inversión en equipamiento.

Por otra parte, una línea puede admitir que se fabriquen en ella diferentes productos. Se llama *línea monoproducto* si en ella se ensambla un solo tipo de producto.

Línea multiproducto, si en ella se obtienen varios productos distintos, pero por lotes. *Línea mixta*, si en ella se fabrican varios productos en orden arbitrario.

Globalmente, se conoce como *problema de equilibrado de líneas de montaje* al problema de decisión que trata de asignar las tareas a las estaciones de la forma más adecuada, tratando de que la carga de estación sea más o menos igual entre ellas, con la finalidad de optimizar algún indicador de eficiencia. Son clásicos, por el hecho de ser los más investigados, los casos en que se minimiza el número de estaciones o el tiempo de ciclo, se maximiza la *eficiencia* (suma de tiempos de tarea dividida por el producto del número de estaciones y el tiempo de ciclo) o simplemente se busca una solución factible.

Como herramienta para facilitar la comprensión de las interrelaciones entre tareas, existe la posibilidad de representarlas gráficamente por medio de *grafos* o *diagramas de precedencias*, constituidos por nodos y arcos. En los *nodos* se representan las tareas, usualmente numeradas y acompañadas por otra cifra, que indica el tiempo de tarea correspondiente. Los *arcos*, imponiendo *restricciones de precedencia* (ligaduras que afectan al momento en que una tarea puede comenzar, al ser necesario, en la mayoría de los casos, esperar a la finalización de otras tareas que deben realizarse antes) condicionan el orden en que se pueden realizar dichas tareas. Respecto a una tarea de referencia, se llama *predecesor directo* a la tarea que debe realizarse inmediatamente antes de ésta y *predecesor indirecto* a la tarea después de finalizada la cual transcurrirá aún cierto tiempo hasta que se inicie la de referencia. Igualmente respecto a una tarea de referencia, se llama *sucesor directo* a la tarea que debe comenzar justo después de ésta y *sucesor indirecto* a la tarea que tardará aún cierto tiempo en iniciarse a partir de la finalización de la de referencia.

La lista de términos expuesta hasta aquí abarca los conceptos que aparecen con más frecuencia en este tipo de problemas, con independencia de la variante que se plantee. Se omite la mención de vocabulario más específico.

4. Enunciado del problema original de líneas de montaje

El problema descrito por Salveson en 1955 es: “*Dado un conjunto de tareas, con tiempos de tarea deterministas conocidos y una ordenación parcial definida por restricciones de precedencia, el problema consiste en asignar tareas a estaciones, de modo que se minimice el número que de éstas se requiere. Esto se debe llevar a cabo cumpliendo que la suma de los tiempos de tarea no exceda el tiempo de ciclo en ninguna estación. Además, las estaciones son estrictamente secuenciales y las tareas deben asignarse sin violar restricciones de precedencia.*” (Johnson, 1981)

Con posterioridad, otros investigadores ofrecieron sus aportaciones al estudio del tema, añadiendo nuevas características y matices que no se habían tenido en cuenta en el trabajo de Salveson. Jackson (1956), Bowman (1960), White (1961), Held et al. (1963) y otros prosiguieron el trabajo intentando encontrar solución óptima al problema por medio de métodos enumerativos de todas, o de las más prometedoras, soluciones factibles. Arcus (1962) y otros trataron de resolver el problema de equilibrado de líneas empleando *heurísticas* (Agrawal, 1985), es decir, procedimientos capaces de generar unas cuantas soluciones factibles suficientemente buenas (algunas veces, óptimas) con tiempos de cálculo razonables.

De esta forma, la literatura sobre equilibrado de líneas de montaje se ha ido enriqueciendo al incorporar aspectos novedosos para ir acercando el mundo académico y la realidad industrial, como pone de manifiesto la tabla 1. Algunos de estos son: a) el

tipo de línea de acuerdo al número de productos que en ella se fabrican (mixta, multiproducto o monoproducto)¹, b) el movimiento de la línea (continuo o intermitente)², c) la disposición de la cadena de montaje en línea o en forma de U³, d) el número de lados de la línea que se usan para llevar a cabo las tareas (uno o dos)⁴, e) la clase de tiempos de tarea (determinista, estocástico, dinámico, dependiente de la secuencia de tareas, etc...)⁵, f) las restricciones de asignación de tareas (ligadas, incompatibles, fijadas a un tipo de estación, que guarden distancias mínimas entre ellas o que no estén separadas más de una cierta distancia)⁶, g) la posibilidad de duplicar componentes (añadir una o más líneas completas a la existente, replicar sólo estaciones o únicamente algunas tareas dentro de ciertas estaciones, añadir varios trabajadores a una misma estación)⁷, h) la asignación de recursos a estaciones (tendencia a agrupar en una misma estación las tareas que requieran recursos idénticos o similares habilidades por parte de los operarios, etc...), i) la colocación de almacenes intermedios de producto en curso a lo largo de la línea para evitar la desocupación de las estaciones, alimentadores que aporten a las estaciones los componentes necesarios para realizar las operaciones, elementos que permitan el cambio de posición de la unidad de producto en caso de que deban realizarse tareas en más de una cara, etc...⁸, j) la influencia de las características del equipo humano en líneas de montaje⁹, k) el tipo de proceso que se realiza en la cadena de montaje (ensamblaje o desensamblaje)¹⁰, l) el objetivo del problema (minimizar estaciones, tiempo de ciclo, costes, o una combinación de variables; maximizar beneficio, eficiencia o una combinación de variables; encontrar soluciones factibles; hacer que la carga de las estaciones sea lo más similar entre ellas, *equilibrado vertical*; hacer que la carga de estación sea lo más similar posible para todos los modelos de una línea mixta, para facilitar la secuenciación, *equilibrado horizontal*), etc...

Véanse las relaciones representativas (no exhaustivas) de referencias obtenidas de <http://www.assembly-line-balancing.de> y de Boysen et al. (2007a), sobre:

¹ líneas mixtas (apéndice A1), líneas multiproducto (apéndice A2) y líneas monoproducto (apéndice A3).

² movimiento de la línea continuo (apéndice A4) o intermitente (apéndice A5).

³ disposición de la línea de montaje en forma de U (apéndice A6).

⁴ el uso de uno o ambos lados de la línea (apéndice A7).

⁵ la clase de tiempos de tarea: determinista, estocástico (apéndice A8) o dinámico (apéndice A9).

⁶ las restricciones de asignación de tareas (apéndice A10).

⁷ la réplica de líneas, estaciones o tareas (apéndice A11).

⁸ almacenes intermedios de producto en curso (apéndice A12).

⁹ Véase la relación representativa (no exhaustiva) de referencias obtenidas de Carnahan et al. (2001) sobre características del equipo humano que influyen en líneas de montaje (apéndice A13).

¹⁰ Véase la relación representativa (no exhaustiva) de referencias obtenidas de Duta et al. (2005) y de Gungor et al., 2000. *Complications in disassembly line balancing*, sobre desensamblaje de productos (apéndice A14).

Precedence Graph Characteristics		Station and Line Characteristics	
Product specific precedence graphs: $\alpha_1 \in \{mix, mult, o\}$		Movement of workpieces: $\beta_1 \in \{olu, unpac^A\}$	
$A_1 = mix$	Mixed-model production	$B_1 = olu$	Paced line; with $\lambda \in \{o, each, prob\}$ and $u \in \{o, div\}$
$A_1 = mult$	Multi-model production	$\lambda = o$: (Average) work content restricted by cycle time	
$A_1 = o$	Single-model production	$\lambda = each$: Each model must fulfill the cycle time	
Structure of the precedence graph: $\alpha_2 \in \{spec, o\}$		$\lambda = prob$: Cycle time is obeyed with a given probability	
$A_2 = spec$	Restriction to a special precedence graph structure	$u = o$: Single global cycle time	
$A_2 = o$	Precedence graph can have any acyclic structure	$u = div$: Local cycle times	
Processing times: $\alpha_3 \in \{t^{sto}, t^{dy}, o\}^*$		$B_1 = unpac^A$ Unpaced line; with $\lambda \in \{o, sync\}$	
$A_3 = t^{sto}$	Stochastic processing times	$\lambda = o$: Asynchronous line	
$A_3 = t^{dy}$	Dynamic processing times (e.g. learning effects)	$\lambda = sync$: Synchronous line	
$A_3 = o$	Processing times are static and deterministic	Line layout: $\beta_2 \in \{o, u^A\}$	
Sequence-dependent task time increments: $\alpha_4 \in \{\Delta t_{dir}, \Delta t_{indir}, o\}^*$		$B_2 = o$ Serial line	
$A_4 = \Delta t_{dir}$	Caused by direct succession of tasks (e.g. tool change)	$B_2 = u^A$ U-shaped line; with $\lambda \in \{o, n\}$	
$A_4 = \Delta t_{indir}$	Caused by succession of tasks (tasks hinder each other)	$\lambda = o$: The line forms a single U	
$A_4 = o$	Sequence-dependent time increments are not considered	$\lambda = n$: Multiple Us forming an n-U line	
Assignment restrictions: $\alpha_5 \in \{link, inc, cum, fix, excl, type, min, max, o\}^*$		Parallelization: $\beta_3 \in \{pline^A, pstat^A, ptask^A, pwork^A, o\}^*$	
$A_5 = link$	Linked tasks have to be assigned to the same station	$B_3 = pline^A$	Parallel lines
$A_5 = inc$	Incompatible tasks cannot be combined at a station	$B_3 = pstat^A$	Parallel stations
$A_5 = cum$	Cumulative restriction of task-station-assignment	$B_3 = ptask^A$	Parallel tasks
$A_5 = fix$	Fixed tasks can only be assigned to a particular station	$B_3 = pwork^A$	Parallel working places within a station
$A_5 = excl$	Tasks may not be assigned to a particular station	$B_3 = o$	Neither type of parallelization is considered
$A_5 = type$	Tasks have to be assigned to a certain type of station	$\lambda \in \{o, 2, 3, \dots\}$: Maximum level of parallelization; o =unrestricted	
$A_5 = min$	Minimum distances between tasks have to be observed	Resource assignment: $\beta_4 \in \{equip, res^A, o\}^*$	
$A_5 = max$	Maximum distances between tasks have to be observed	$\beta_4 = equip$	Equipment selection problem
$A_5 = o$	No assignment restrictions are considered	$\beta_4 = res^A$	Equipment design problem; with $\lambda \in \{o, 0.1, max\}^*$
Processing alternatives: $\alpha_6 \in \{pa^A, o\}$		$\Lambda = 0.1$: If two tasks share a resource, investment costs are reduced at a station	
$A_6 = pa^A$	Processing alternatives; with $\lambda \in \{o, prec, subgraph\}$	$\Lambda = max$: Most challenging task defines the needed Qualification level of a resource	
$\Lambda = o$: Processing times and costs are altered		$\Lambda = o$: Other type of synergy and/or dependency	
$\Lambda = prec$: Precedence constraints are additionally altered		$\beta_4 = o$ Processing alternatives are not considered	
$\Lambda = subgraph$: Subgraphs are additionally altered			
$A_6 = o$	Processing alternatives are not considered		
Objectives		Station-dependent time increments: $\beta_5 \in \{\Delta t_{unp}, o\}$	
Objectives: $\gamma \in \{m, c, E, Co, Pr, SSL^A, score, o\}^*$		$\beta_5 = \Delta t_{unp}$	Unproductive activities at a station are considered
$\Gamma = m$	Minimize the number of stations m	$\beta_5 = o$	Station-dependent time increments are not regarded
$\Gamma = c$	Minimize cycle time c	Additional configuration aspects: $\beta_6 \in \{buffer, feeder, mat, change, o\}^*$	
$\Gamma = E$	Maximize line efficiency E	$\beta_6 = buffer$	Buffers have to be allocated and dimensioned
$\Gamma = Co$	Cost minimization	$\beta_6 = feeder$	Feeder lines are to be balanced simultaneously
$\Gamma = Pr$	Profit maximization	$\beta_6 = mat$	Material boxes need to be positioned and dimensioned
$\Gamma = SSL^A$	Station times are to be smoothed; with $\lambda \in \{stat, line\}$	$\beta_6 = change$	Machines for position changes of workpieces required
$\lambda = stat$: Within a station (horizontal balancing)		$\beta_6 = o$	No additional aspects of line configuration are regarded
$\lambda = line$: Between stations (vertical balancing)			
$\Gamma = score$	Minimize or maximize some composite score		
$\Gamma = o$	Only feasible solutions are searched for		

Tabla 1. Esquema clasificatorio de problemas de equilibrado de líneas de montaje (Boysen et al., 2007b)

5. Productos voluminosos y cadenas de montaje

Sin embargo, a pesar del tiempo transcurrido desde que dio comienzo el estudio de líneas de ensamblaje desde el punto de vista académico, parece ser que el aspecto concerniente a productos voluminosos no ha sido tratado todavía. Un análisis extenso, según autores y palabras clave¹¹ de la literatura publicada sugiere la inexistencia de estudios sobre la cuestión.

Asimismo, tampoco ha podido validarse relación alguna entre cadenas de montaje en forma de U y productos de gran volumen. La intención subyacente en esta manera de enfocar la cuestión ha sido la voluntad de conocer si las dimensiones del producto que se desea fabricar condicionan la forma de la línea en la cual se debe producir o, al revés, si el tipo de línea impone restricciones acerca de la longitud, anchura y profundidad de aquello que se debe ensamblar.

No obstante, más de un autor destaca los productos voluminosos como campo de posible investigación para el futuro, señalándolo por medio de breves comentarios que abordan diferentes consideraciones sobre ellos:

- Desarrollo simultáneo de tareas distintas:
“En varios tipos de industria, en particular en la de la automoción, el producto que se ensambla es suficientemente voluminoso como para permitir a varios operarios trabajar sobre él a la vez” (Falkenauer, 2005; en inglés, usa el término *voluminous*).
- Necesidad de varios trabajadores para alguna tarea:
“El ensamblaje de productos voluminosos, como los coches, a veces requiere que varios operarios colaboren en una misma tarea” (Falkenauer, 2005; en el texto original, la palabra es *large*).
- Dificultad para rotar el producto voluminoso si hay tareas sobre varias caras:
“Una dificultad considerable en el ensamblaje de productos voluminosos es que abultan demasiado como para ser movidos (elevados, rotados) con facilidad” (Falkenauer, 2005; el autor lo explica empleando el vocablo *bulky*).
- Series de producción limitadas:
“El presente artículo trata de encontrar el número óptimo de estaciones para una línea de montaje que produce una cantidad limitada de un producto nuevo bajo condiciones de aprendizaje. Este tipo de producción es característico de productos pesados (como aviones y sistemas de comunicación) y de industrias de aplicaciones científicas (por ejemplo, instrumentos de corte por láser y equipos especiales para hospitales)” (Cohen y Dar-El, 1998; los investigadores se refieren a productos como aviones, por ejemplo, que no sólo son pesados sino también voluminosos).

¹¹ Búsqueda llevada a cabo principalmente en la página <http://www.assembly-line-balancing.de> y en Google Scholar. En primera instancia, se ha centrado en palabras generales. Posteriormente, se ha focalizado en términos o expresiones que pudieran poner de manifiesto posibles estudios sobre productos voluminosos: bulky, complex, distance, heavy, high-volume, large, layout, length, product dimensions, restriction, space requirements, station, U-line, visibility area, visibility region, voluminous, workpiece.

- Únicamente una parte del producto es accesible desde la estación de trabajo:
“Por ejemplo, las restricciones de asignación son útiles en la modelización y resolución de problemas de equilibrado de líneas de montaje en los cuales se tratan productos voluminosos, como coches o camiones, donde sólo una parte de las posiciones de montaje es accesible desde la misma estación o puesto de trabajo debido a restricciones de distancia, acceso o posición, como en el caso, entre otros, de las líneas con estaciones a ambos lados” (Scholl et al., 2008; originalmente se menciona *large workpieces*).

Igualmente se advierte la presencia de publicaciones del ámbito de la robótica y de la automática (Dailami y Redford, 1998; Wallace y Sackett, 1996) en las cuales aparece alguna de las expresiones citadas previamente (*large products*, por ejemplo). Sin embargo, su interés se centra en aspectos como el adecuado posicionamiento de robots en las líneas de montaje, las características que han de tener los brazos articulados según la aplicación, etc... Desde el punto de vista de organización industrial y de optimización de procesos, estos aspectos que tienen que ver con el buen funcionamiento del sistema en su conjunto se asume que vienen dados y no son objeto de estudio.

6. Formalización del problema de productos voluminosos

Dado que, hasta donde ha sido posible explorar, no se ha encontrado formalización alguna del concepto de productos voluminosos, a continuación se procede a ello. A tal efecto, se toma como referencia la tesis doctoral *Algorithmic approaches for two fundamental optimization problems: workload-balancing and planar Steiner trees*, Matthias Müller-Hannemann (2006), y dos artículos que de ella derivan: Müller-Hannemann y Weihe (2006) y Tazari et al. (2006). Esta elección se justifica porque uno de los aspectos particulares del problema que expone es la incapacidad de operar sobre la unidad de producto en curso a lo largo de ciertas fases del tiempo de ciclo y, con el tratamiento adecuado, podría asimilarse a una definición de producto voluminoso.

La relación de características del problema de productos voluminosos que se propone es la que sigue:

- Producto voluminoso absoluto o relativo:

El calificativo de *absoluto* pretende dar a entender que existen unos criterios establecidos, según los cuales, a partir de unas ciertas dimensiones del objeto, éste puede ser catalogado de voluminoso. El término *relativo* quiere expresar que el producto se considera voluminoso por el hecho de tener unas dimensiones, sean cuales sean, superiores a las de la estación de trabajo. Una y otra características no son excluyentes, pudiéndose dar los siguientes casos:

Caso 1. En términos absolutos y relativos.

Las dimensiones del objeto sobrepasan los límites establecidos por los criterios fijados (absoluto) y las dimensiones de la estación de trabajo (relativo).

Caso 2. En términos absolutos, pero no relativos.

Las dimensiones del objeto sobrepasan los límites establecidos por los criterios fijados (absoluto), pero no las dimensiones de la estación de trabajo¹².

Caso 3. En términos relativos, pero no absolutos.

Las dimensiones del objeto no sobrepasan los límites establecidos por los criterios fijados para considerarlo voluminoso absoluto, pero sí las dimensiones de la estación de trabajo (relativo).

Caso 4. Ni en términos absolutos ni relativos.

Las dimensiones del objeto no sobrepasan ni los límites establecidos por los criterios fijados para considerarlo voluminoso absoluto ni las dimensiones de la estación de trabajo.

La tabla 2 expone sintéticamente la casuística explicada:

Producto voluminoso			Dimensiones > Límites	
En términos		En términos	producto	(criterios)
Relativos		absolutos		
			Sí	No
Dimensiones > Dimensiones	producto estación	Sí	Caso 1	Caso 3
		No	Caso 2	Caso 4

Tabla 2. Casos posibles de producto voluminoso, según sus propias dimensiones y en relación a las dimensiones de la estación

- Avance de la línea:

Indica cómo se produce el movimiento de la cadena de montaje para desplazar las unidades sobre las cuales se trabaja. En primera instancia, se observan dos clases de avance:

Avance continuo. La línea no para nunca y es obligación del operario (en las líneas manuales) o de la máquina (en las líneas automáticas) adaptar su ritmo de trabajo o posición en la estación para conseguir finalizar las tareas que le corresponden.

Avance intermitente síncrono. La línea, de manera intermitente, se queda parada para que los trabajadores (en las líneas manuales) o las máquinas (en las líneas automáticas) puedan ejecutar las tareas que tienen asignadas. Es necesario controlar, en estos casos, la distancia que recorre la línea entre dos paros consecutivos y el tiempo que permanece parada. Ello da lugar a cuatro subdivisiones¹³:

¹² Probablemente carezca de sentido llevar a la práctica un caso como éste, que implica diseñar una estación de trabajo con unas dimensiones considerables. No obstante, no se observan impedimentos que permitan pensar en algo de este estilo, al menos a nivel teórico.

¹³ La concentración/dispersión en la superficie de la unidad de producto de las tareas que deben realizarse y las diferencias entre las dimensiones de las estaciones, determinan el avance a paso fijo o variable.

La variabilidad de la carga de la estación, dependiendo de las tareas realizables según la fase (en función de la parte de producto que queda dentro de la región de visibilidad) explica el avance a intervalo fijo o variable.

Paso fijo - Intervalo fijo.

La distancia recorrida entre dos paros consecutivos es siempre la misma.
El tiempo que la cadena de montaje está parada es siempre el mismo.

Paso fijo - Intervalo variable.

La distancia recorrida entre dos paros consecutivos es siempre la misma.
El tiempo que la cadena de montaje está parada puede variar.

Paso variable - Intervalo fijo.

La distancia recorrida entre dos paros consecutivos no es siempre la misma¹⁴.
El tiempo que la cadena de montaje está parada es siempre el mismo.

Paso variable - Intervalo variable.

La distancia recorrida entre dos paros consecutivos no es siempre la misma¹⁴.
El tiempo que la cadena de montaje está parada puede variar.

La tabla 3 recoge los posibles modos en que se puede hacer avanzar la línea:

Avance	Paso	Intervalo
Continuo		
Discreto	Fijo	Fijo
	Variable	Variable

Tabla 3. Clasificación de los tipos de avance de la línea.

- Función objetivo del problema de optimización:

Contempla la minimización o maximización de algún indicador de eficiencia (número de estaciones de trabajo, tiempo de ciclo, coste, beneficio, etc...) o la búsqueda de solución factible para el problema.

- Tareas preasignadas o no preasignadas:

Tareas *preasignadas* son aquellas que necesariamente han de realizarse en una determinada estación de trabajo de la línea debido a cierta restricción (por ejemplo, el requerimiento de maquinaria específica para su desarrollo).

Tareas *no preasignadas* son aquellas cuya realización puede llevarse a cabo en cualquier estación o en un grupo determinado de éstas.

Esta característica de las tareas queda plasmada en la tabla 4:

Tareas	Preasignadas
	No preasignadas

Tabla 4. Tipos de tarea según su posibilidad de ser asignadas a las estaciones.

¹⁴ Por construcción mecánica del sistema, se puede considerar que cualquier distancia recorrida es la suma de cierto número de pasos de longitud elemental Δ . Este aspecto se tiene en cuenta también en el tratamiento matemático del problema.

- Precedencias:

Existen precedencias cuando es necesario respetar un cierto orden en la realización de las tareas, de modo que el inicio de algunas de ellas no puede tener lugar antes de la conclusión de otras.

No existen precedencias cuando carece de relevancia el orden en la realización de las tareas, ya que no es necesario esperar a la conclusión de unas para que otras den inicio.

En la tabla 5 se expresa concisamente esta otra consideración sobre las tareas:

Precedencias	Existen
	No existen

Tabla 5. Posibilidad de realización simultánea o consecutiva de las tareas.

La agrupación de las características que se acaban de exponer origina la tabla 6:

Producto voluminoso	Caso 1: Absoluto y relativo		
	Caso 2: Absoluto, no relativo		
	Caso 3: Relativo, no absoluto		
	Caso 4: Ni relativo ni absoluto		
Avance de línea	Continuo		
	Discreto	Paso	Fijo
			Variable
	Intervalo	Intervalo	Fijo
Variable			
Función objetivo	Minimizar	Nº de estaciones	
		Tiempo de ciclo	
		Costes	
		Combinación de variables	
	Maximizar	Eficiencia	
		Beneficios	
		Combinación de variables	
Soluciones factibles			
Tareas	Preasignadas		
	No preasignadas		
Precedencias	Existen		
	No existen		

Tabla 6. Resumen de características del problema de productos voluminosos.

7. Características de los problemas descritos en las referencias

Un análisis más detallado de los problemas descritos en dicha tesis doctoral (Müller-Hanneman, 2006) y en los artículos de referencia (Müller-Hannemann y Weihe, 2006; Tazari et al., 2006), con la finalidad de conocer la totalidad de las características e hipótesis de trabajo sobre las cuales se sustentan (no sólo la incapacidad de operar sobre

la unidad de producto en curso a lo largo de ciertas fases del tiempo de ciclo) muestra lo siguiente:

Características generales:

- *La línea de montaje:*
 - procesa cíclicamente un número potencialmente infinito de unidades idénticas (una posición de referencia indica el final de un ciclo e inicio del siguiente)
 - es automatizada
 - cuando se mueve, desplaza todas las unidades a la vez
 - el tiempo de desplazamiento considera aceleración, deceleración y distancia recorrida
- *Cada estación:*
 - ha de realizar un conjunto de tareas sobre cada unidad
 - puede procesar partes de diferentes unidades al mismo tiempo
 - tiene su propia región de visibilidad (que no intersecta con otras contiguas)
- *Cada unidad:*
 - se proporciona a la línea con una cierta separación fija y conocida respecto a su precedente
 - puede ser procesada por varias estaciones simultáneamente
- *Cada tarea:*
 - debe finalizarse si se ha iniciado (no se puede interrumpir)
 - se procesa en un lugar específico de la unidad
 - se puede hacer sólo si está en la región de visibilidad de la estación que la ejecuta
 - se ejecuta con la línea de montaje parada (fase estacionaria)
 - tiene un tiempo de tarea parecido al de todas las otras tareas
- El *número de tareas* es elevado respecto al número de estaciones y de pasos de avance.
- *La distancia:*
 - entre dos unidades es fija
 - entre estaciones es pequeña comparado con las dimensiones de las unidades
- *Los pasos de avance:*
 - pueden ser más pequeños que la distancia entre dos estaciones
 - son variables, pero múltiplos de un valor elemental Δ
- *La tasa de producción* viene determinada por:
 - el esquema de avance:
 - > el número de pasos de avance
 - > los desplazamientos de los pasos individuales de avance
 - > la posición de referencia x
 - la distribución de tareas a lo largo de las fases estacionarias

- Cada *fase*:
 - tiene una duración que viene dada por la máxima carga de estación en esa fase
- Los *objetivos del problema* son:
 - determinar el esquema de avance
 - asignar cada tarea a una fase estacionaria (y a una estación, según el caso)
 - minimizar el tiempo de ciclo (suma de tiempos de tarea y movimiento de línea)

Características particulares:

- Cada *estación*:
 - tiene un brazo robotizado que coloca componentes
- Cada *unidad*:
 - es una placa de circuito impreso
- Cada *tarea*:
 - tiene un tiempo de tarea bastante inferior al tiempo de ciclo
- Cada *brazo robotizado*:
 - necesita adaptar su terminación al tipo de componentes que debe manipular
 - realiza cíclicamente las operaciones siguientes:
 - + coger componente del alimentador
 - + trasladar componente hasta placa de circuito impreso
 - + colocar componente en placa de circuito impreso
 - + volver a alimentador para coger siguiente componente
- Cada *alimentador*:
 - es específico según el tipo de componente

Datos¹⁵:

- El número de estaciones de la línea de montaje.
- La región de visibilidad de cada estación.
- El conjunto de tareas que hay que realizar sobre cada unidad.
- El punto en que se realiza cada tarea en cada unidad.
- Los tiempos de tarea.
- El tiempo de preparación (tiempo que tarda el brazo robotizado en volver a la configuración inicial).

8. Contribución de las referencias al problema de productos voluminosos

Al intentar adecuar las características de los problemas descritos en Müller-Hannemann y Weihe (2006) y Tazari et al. (2006) a las del problema general de productos voluminosos (ver tabla 6), se observa que:

¹⁵ En las referencias, en “Moving policies in cyclic assembly line scheduling” (Müller-Hannemann y Weihe, 2006) las tareas asignadas a cada estación son dato, pero se desconoce el número de fases. En cambio, en “Workload balancing in multi-stage production processes” (Tazari et al., 2006) se desconocen las tareas de cada estación, pero es dato el número de fases.

- Indistintamente, en relación al tipo de producto voluminoso, puede tratarse del caso 1 o del caso 3. Se alude al concepto de *producto voluminoso relativo* al señalar que una misma unidad puede ser procesada por varias estaciones simultáneamente, que cada tarea sólo se puede hacer si está en la región de visibilidad de la estación y que la distancia entre estaciones es pequeña comparado con las dimensiones de las unidades. Está ausente, sin embargo, cualquier referencia a producto voluminoso absoluto, al no ser necesario para abordar los problemas descritos.
- Por lo que respecta al avance de línea, éste es siempre *intermitente síncrono* en los casos presentados (alternancia de momentos en que la línea está parada con momentos en que la línea se desplaza). El hecho de que entre los objetivos del problema se encuentre determinar el esquema de avance (en particular, los desplazamientos de los pasos individuales de avance) es indicativo de que se trata de un caso de *paso variable*. Por su parte, que cada fase tenga una duración que viene dada por la máxima carga de estación en dicha fase, revela que se trata de un caso de *intervalo variable*.
- La función objetivo a la cual se hace mención es la *minimización del tiempo de ciclo*.
- Una de las referencias (Müller-Hannemann y Weihe, 2006) considera *tareas preasignadas* a estaciones (cada tarea sólo puede llevarse a cabo en una estación), mientras que otra (Tazari et al., 2006) asume *tareas no preasignadas* (siendo también necesario asignar cada tarea a una estación).
- Las referencias describen problemas de montaje de componentes en placas de circuito impreso en las cuales el orden en que éstos se colocan es irrelevante, ya que parece que ninguna inserción de componente resulta un impedimento para la colocación de ningún otro con posterioridad. Por ello, *no existen precedencias*.

Así, las características del problema descrito en Müller-Hannemann y Weihe (2006) son: producto voluminoso relativo, avance de línea discreto (intermitente síncrono) con paso variable e intervalo variable, función objetivo minimización del tiempo de ciclo, tareas preasignadas a estaciones y ausencia de precedencias entre tareas.

Por su parte, las características del problema descrito en Tazari et al. (2006) son: producto voluminoso relativo, avance de línea discreto (intermitente síncrono) con paso variable e intervalo variable, función objetivo minimización del tiempo de ciclo, tareas no preasignadas a estaciones y ausencia de precedencias entre tareas.

En la tabla 7 se destacan los aspectos comunes que contemplan los artículos de referencia *Moving policies in cyclic assembly line scheduling* (Müller-Hannemann y Weihe, 2006) y *Workload balancing in multi-stage production processes* (Tazari et al., 2006).

Producto voluminoso	Caso 1: Absoluto y relativo		
	Caso 2: Absoluto, no relativo		
	Caso 3: Relativo, no absoluto		
	Caso 4: Ni relativo ni absoluto		
Avance de línea	Continuo		
	Discreto	Paso	Fijo
			Variable
		Intervalo	Fijo
Variable			
Función objetivo	Minimizar	Nº de estaciones	
		Tiempo de ciclo	
		Costes	
		Combinación de variables	
	Maximizar	Eficiencia	
		Beneficios	
		Combinación de variables	
Soluciones factibles			
Tareas	Preasignadas		
	No preasignadas		
Precedencias	Existen		
	No existen		

Tabla 7. Características comunes encontradas en “Moving policies in cyclic assembly line scheduling” y en “Workload balancing in multi-stage production processes”.

La tabla 8 muestra el aspecto diferencial existente entre los casos planteados por los artículos de referencia. En *Moving policies in cyclic assembly line scheduling* (Müller-Hannemann y Weihe, 2006) las tareas están preasignadas, mientras que en *Workload balancing in multi-stage production processes* (Tazari et al., 2006) las tareas no están preasignadas.

Tareas	Preasignadas
	No preasignadas

Tabla 8. Característica diferente entre “Moving policies in cyclic assembly line scheduling” y “Workload balancing in multi-stage production processes”.

9. Enunciado del problema de productos voluminosos

Una línea de montaje de m estaciones procesa un número potencialmente infinito de unidades idénticas (en el problema descrito en Müller-Hannemann y Weihe (2006) y en Tazari et al. (2006), las unidades son placas de circuito impreso). Varias unidades se encuentran de manera simultánea en la línea y la distancia de separación entre unidades consecutivas es fija. Cada estación (máquina) de la línea debe llevar a cabo un conjunto de tareas en cada unidad. Qué tareas debe realizar cada estación puede ser dato o incógnita. Las tareas no admiten interrupción. Cada tarea se ejecuta en una posición concreta, conocida, de la unidad. Una tarea sólo puede realizarse si está en la región de visibilidad de la estación donde se ha de hacer. La región de visibilidad de la estación i es un intervalo $[L_i \dots R_i]$ de la línea de montaje (ver figura 1), donde L_i es la coordenada (un número real) del límite izquierdo de la región de visibilidad de la estación i y R_i es la coordenada (un número real) del límite derecho de la región de visibilidad de la

estación, ambas referidas a un punto de referencia común. No existe intersección entre regiones de visibilidad. El proceso se descompone en fases estacionarias, durante las cuales la línea permanece parada. Una vez concluida una fase estacionaria, la línea se desplaza hacia delante y comienza la fase estacionaria siguiente. Las tareas se realizan durante las fases estacionarias, es decir, mientras la línea permanece parada. Los tiempos de tarea son dato, son bastante similares entre sí y el mayor de los tiempos de tarea es bastante pequeño en comparación con el tiempo de ciclo.

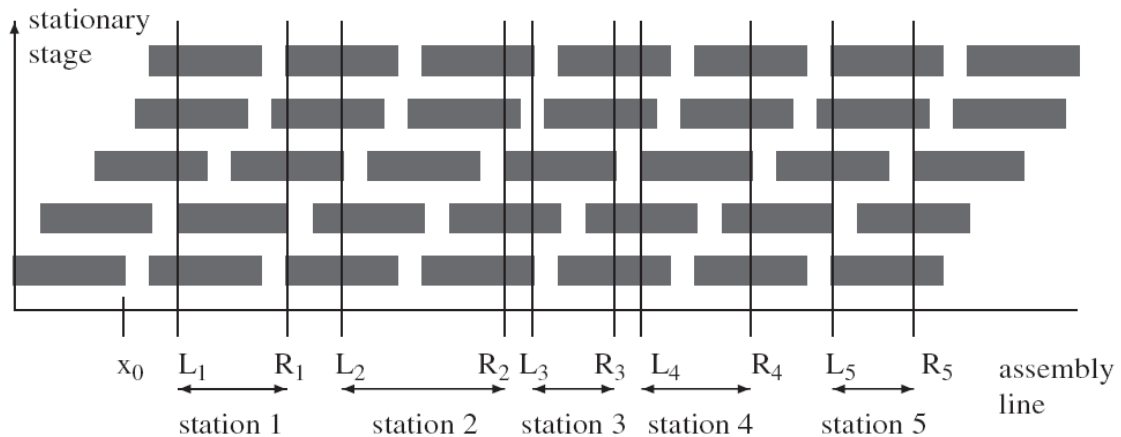


Figura 1. Esquema de avance (cíclico) de una línea de montaje con 5 estaciones. En este ejemplo, hay cuatro fases estacionarias (la quinta es idéntica a la primera). Los desplazamientos no son idénticos.

Cada estación dispone de un brazo robotizado que coloca diversos componentes en las unidades. Una tarea corresponde a varios pasos de montaje: coger un componente de un alimentador, moverlo desde el alimentador hasta su posición de colocación en la unidad, colocar el componente y volver al alimentador a por el siguiente componente. Los alimentadores son específicos para cada tipo de componente (ver figura 2).

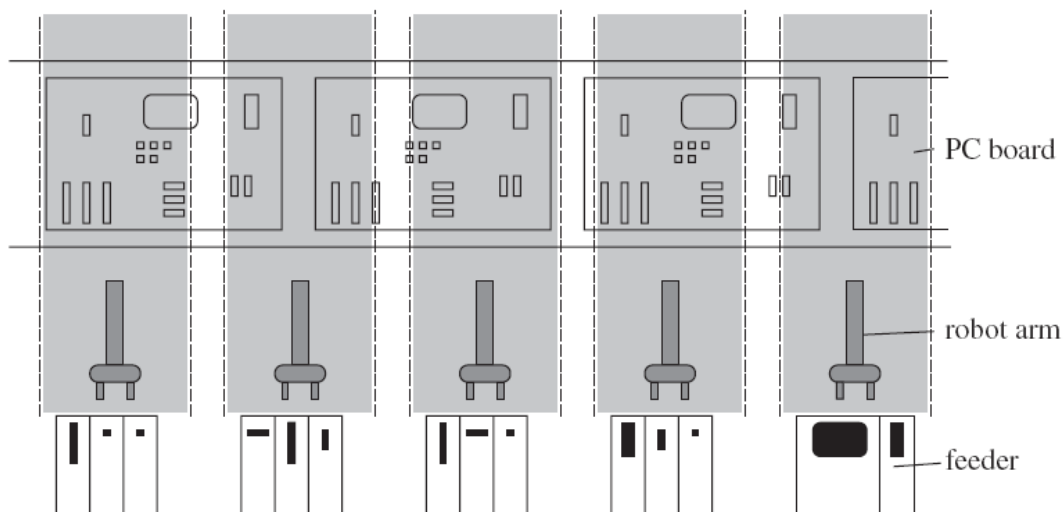


Figura 2. Vista esquemática de una línea de montaje con 5 estaciones. El área gris resalta la región de visibilidad de cada estación.

Las unidades tienen dimensiones relativamente grandes en comparación con la distancia entre estaciones, las cuales están bastante juntas entre sí. Los pasos de avance

de la línea son relativamente pequeños. En consecuencia, una misma unidad puede ser procesada por varias estaciones en la misma fase estacionaria y una misma estación puede procesar varias unidades en la misma fase estacionaria (ver figura 1 de nuevo). Todas las unidades han de procesarse según un esquema idéntico. En particular, cada unidad debe ocupar la posición de su predecesor inmediato después de un número s de fases estacionarias.

Dada una configuración inicial, el movimiento de la línea de montaje queda descrito completamente por un esquema de avance, es decir, el número de pasos de avance y los desplazamientos de cada paso de avance individual. El esquema de avance determina las posiciones de las unidades para cada fase estacionaria. Debido a la restricción impuesta por la región de visibilidad de cada estación, cada tarea sólo puede realizarse en un subconjunto de fases estacionarias: en aquellas en las cuales es “visible” para cada máquina.

Los desplazamientos de los pasos de avance no pueden ser arbitrariamente pequeños: están acotados inferiormente por un parámetro Δ , del cual deben ser múltiplo. El número total de tareas es considerablemente mayor que el número de pasos de avance.

El problema de optimización resultante es el siguiente: determinar (1) un esquema de avance y (2) para cada tarea, una asignación a una fase estacionaria (y a una estación, si procede), de modo que la posición de la tarea en la unidad sea “visible” para la estación que tiene que llevarla a cabo. El objetivo es minimizar el tiempo de ciclo, es decir, la suma de los tiempos de proceso de las s fases estacionarias más el tiempo de movimiento de la línea entre dos fases estacionarias.

10. Modelo matemático propuesto para el problema de productos voluminosos. Caso de Müller-Hannemann y Weihe (2006).

Teniendo en cuenta el cuadro de características del problema de productos voluminosos y la contribución de las referencias al estudio de este problema, se procede a presentar un modelo matemático para resolver el mismo caso que en Müller-Hannemann y Weihe (2006) (casos 1 ó 3 de producto voluminoso; avance de línea: discreto a paso variable e intervalo variable; función objetivo: minimizar el tiempo de ciclo; tareas: preasignadas; precedencias: no existen). Dicho modelo matemático es el que se describe en Corominas y Pastor (2009):

▪ Datos	
N	número de tareas
m	número de máquinas (estaciones)
$[L_i, R_i]$	región de visibilidad ($i = 1, \dots, m$), donde: $L_1 = 0$ $L_i < R_i \quad i = 1, \dots, m$ $R_i < L_{i+1} \quad i = 1, \dots, m-1$
A_0	tamaño de la unidad (que denominamos longitud) a lo largo del eje horizontal (asumiendo que la dirección del movimiento de las unidades coincide con el del eje).
A	distancia entre los extremos izquierdos de dos unidades consecutivas en la línea de montaje; por tanto, igual a la longitud de la unidad, A_0 , más la separación entre dos unidades consecutivas.

T	tiempo de preparación (depende del tiempo para acelerar y frenar las unidades más el tiempo para volver los brazos robotizados a la configuración inicial entre dos fases estacionarias consecutivas); el tiempo total del ciclo es igual a la suma de (i) los tiempos correspondientes a las fases estacionarias que constituyen un ciclo más (ii) el tiempo de preparación multiplicado por el número de fases estacionarias más (iii) el tiempo para mover las unidades hacia delante durante el ciclo a la máxima velocidad (como este tiempo es constante, puede ser desestimado de cara a la optimización).
Δ	longitud de un paso elemental (todos los pasos de avance de la línea deben ser un múltiplo de Δ ; por tanto, $\gcd(A, \Delta) = \Delta$).
J_0	conjunto de tareas; $ J_0 = N$
J_i	conjunto de tareas que se realizan en la máquina i ($i = 1, \dots, m$), donde: $\bigcup_{i=1, \dots, m} J_i = J_0 \text{ y } J_i \cap J_k = \emptyset \quad \forall i, k$
p_j	tiempo de proceso de la tarea j ($j = 1, \dots, N$)
a_j	($0 \leq a_j \leq A_0$) distancia al extremo derecho de la unidad correspondiente a la tarea j ($j = 1, \dots, N$)
S	cota superior del número de pasos de avance en un ciclo $\left(S \leq \frac{A}{\Delta} \right)$. $S = \frac{A}{\Delta}$ si todos los pasos de avance consisten en un solo paso elemental; consideraciones específicas pueden llevar a un valor inferior de esta cota superior.

▪ Variables

$x \geq 0$	posición inicial del extremo derecho de la unidad respecto al límite izquierdo de la estación 1 (recordar que $L_1 = 0$): $0 \leq x \leq R_1 + a_1^{\min}$, donde $a_1^{\min} = \min_{j \in J_1} a_j$.
$\delta_s \in \mathbb{Z}^+$	número de pasos elementales del paso de avance s ($s = 1, \dots, S$); $\delta_s \leq \frac{A}{\Delta}$
$\eta_s \in \{0, 1\}$	$\eta_s = 1$ si el paso de avance s ($s = 1, \dots, S$) existe (es decir, tiene un número positivo de pasos elementales).
$y_{js} \in \{0, 1\}$	$y_{js} = 1$ si la tarea j se realiza durante la fase estacionaria sucesiva al paso de avance $s-1$ ($j = 1, \dots, N; s = 1, \dots, S$)
$k_j \in \mathbb{Z}^+$	número de unidades en la línea que preceden a una unidad cuando la tarea j se realiza sobre esta última ($j = 1, \dots, N$); $\left\lceil \frac{L_i + a_j - R_1 - a_1^{\min} - A + \Delta}{A} \right\rceil \leq k_j \leq \left\lfloor \frac{R_i + a_j}{A} \right\rfloor, \text{ donde } i \mid j \in J_i.$
C_s	tiempo de finalización, para toda la línea, correspondiente a la fase estacionaria sucesiva al paso de avance $s-1$ ($s = 1, \dots, S$)

▪ Modelo

$$[MIN] z = T \cdot \sum_{s=1}^S \eta_s + \sum_{s=1}^S C_s \quad (1)$$

$$\sum_{s=1}^S \delta_s = \frac{A}{\Delta} \quad (2)$$

$$\delta_s \leq \frac{A}{\Delta} \cdot \eta_s \quad s = 1, \dots, S \quad (3)$$

$$\eta_{s+1} \leq \eta_s \quad s = 1, \dots, S-1 \quad (4)$$

$$A \cdot k_j - a_j + x + \Delta \cdot \sum_{l=1}^{s-1} \delta_l \geq L_i - M_{js} \cdot (1 - y_{js}) \quad s = 1, \dots, S; \quad j = 1, \dots, N; \quad i | j \in J_i \quad (5)$$

$$A \cdot k_j - a_j + x + \Delta \cdot \sum_{l=1}^{s-1} \delta_l \leq R_i + M'_{js} \cdot (1 - y_{js}) \quad s = 1, \dots, S; \quad j = 1, \dots, N; \quad i | j \in J_i \quad (6)$$

$$\sum_{s=1}^S y_{js} = 1 \quad j = 1, \dots, N \quad (7)$$

$$C_s \geq \sum_{j \in J_i} p_j \cdot y_{js} \quad i = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, S \quad (8)$$

$$C_s \leq \max_{i=1, \dots, m} \left(\sum_{j \in J_i} p_j \right) \cdot \eta_s \quad s = 1, \dots, S \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J_i} y_{js} \leq |J_i| \cdot \eta_s \quad i = 1, \dots, m; \quad s = 1, \dots, S \quad (9')$$

$$y_{js} \leq \eta_s \quad j = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, S \quad (9'')$$

donde:

$$M_{js} \geq L_i - A \cdot k_j + a_j - x - \Delta \cdot \sum_{l=1}^{s-1} \delta_l$$

$$M'_{js} \geq A \cdot k_j - a_j + x + \Delta \cdot \sum_{l=1}^{s-1} \delta_l - R_i$$

luego, $(i | j \in J_i)$:

$$M_{js} = L_i - A \cdot \left\lceil \frac{L_i + a_j - R_i - a_1^{\min} - A + \Delta}{A} \right\rceil + a_j - \Delta \cdot (s-1)$$

$$\begin{aligned} M'_{js} &= A \cdot \left\lceil \frac{R_i + a_j}{A} \right\rceil - a_j + R_i + a_1^{\min} + A - \Delta - R_i = \\ &= A \cdot \left(\left\lceil \frac{R_i + a_j}{A} \right\rceil + 1 \right) + R_i - R_i - \Delta - a_j + a_1^{\min} \end{aligned}$$

- Nota:

El objetivo (1) es minimizar el tiempo de ciclo. La restricción (2) impone que el número de pasos elementales en un ciclo corresponda a la distancia entre los extremos izquierdos de dos unidades consecutivas. La restricción (3) fuerza que el paso de avance s exista si el número de los correspondientes pasos elementales es positivo. La restricción (4) elimina simetrías, asegurando que el paso de avance s existe sólo si el paso de avance $s-1$ existe. Las restricciones (5) y (6) garantizan, para cada tarea, que ésta es accesible desde la única estación que puede realizar la tarea, durante la fase estacionaria en la cual la tarea se realizará. La restricción (7) impone que cada tarea tiene que ser asignada a una, y sólo una, fase estacionaria. La restricción (8), que el tiempo correspondiente a las fases estacionarias no es menor que el tiempo de proceso en ninguna estación. Finalmente (9), (9') y (9'') son maneras alternativas de forzar la existencia de una fase estacionaria cuando al menos se le asigna una tarea.

11. Juegos de datos.

Para que el estudio del problema de productos voluminosos tenga utilidad práctica, se realiza una búsqueda de juegos de datos realistas referidos a placas de circuito impreso (ver apéndice A15). Los resultados obtenidos tras el análisis de publicaciones que tratan sobre el tema son los siguientes:

Publicación	Datos encontrados
<i>Ammons et al. (1997)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Características de la solución del problema (tiempo, número de tipos de componente, número de tipos de placa, número de estaciones de trabajo y número de restricciones)
<i>Croci et al. (2000)</i>	Número de máquinas en la línea de montaje Tiempo de colocación de componentes
<i>Ellis et al. (2002)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Tiempo de colocación de componentes Velocidad de la máquina que coloca componentes
<i>Grunow et al. (2004)</i>	Tiempo de colocación de componentes Velocidad de la máquina que coloca componentes Dimensiones de las placas de circuito impreso Número de tipos de componente por placa
<i>Günther et al. (1996)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Tiempo de colocación de componentes Tiempo de preparación de máquinas
<i>Hillier y Brandeau (2001)</i>	Características de la solución del problema (tiempo, número de componentes, número de estaciones de trabajo, número de variables, número de restricciones y diferencia respecto al óptimo)
<i>Kazaz y Altinkemer (2003)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Características de la solución del problema (número de ejemplares resueltos, tiempo de obtención de la solución, porcentaje de error)
<i>Khoo y Ng (1998)</i>	Tabla de prioridades de inserción de componentes según el tipo Coordenadas de posición de los componentes en las placas
<i>Kulak et al. (2008)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Dimensiones de las placas de circuito impreso Tiempo de colocación de componentes
<i>Leon y Peters (1998)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Coordenadas de posición de los componentes en las placas Tiempo de cambio de alimentadores Velocidad de la máquina que coloca componentes Número de tipos de placas de circuito impreso Porcentaje de componentes comunes entre placas Tamaño de lote
<i>Li et al. (2008)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Coordenadas de posición de los componentes en las placas Características de la solución del problema (solución inicial, mejor solución encontrada)
<i>Neammanee y Randhawa (2003)</i>	Número de tipos de componente por placa Mínimo y máximo número de componentes de un mismo tipo por placa Número de tipos de placas de circuito impreso Número de máquinas por línea de montaje y número de líneas de montaje Tiempo de colocación de componentes Tiempo de preparación de máquinas
<i>Ong y Tan (2002)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Coordenadas de posición de los componentes en las placas
<i>Sutherland y Oestreich (1973)</i>	Fórmulas matemáticas para cálculos numéricos referidos a placas (número de componentes, dimensiones de placa, etc...)
<i>Wang et al. (1998)</i>	Número de tipos de componente por placa Coordenadas de posición de los componentes en las placas
<i>Wu et al. (2009)</i>	Número de componentes y número de tipos de componente por placa Número de tipos de placas de circuito impreso Coordenadas de posición de los componentes en las placas Características de la solución del problema (solución óptima, tiempo de resolución)

Referencias

1. Agrawal, P. K., 1985. The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 23:2, 403-421.
2. Arcus, A. L., 1962. Assembly line balancing by computer. Graduate School of Business, University of California, Berkeley.
3. Arcus, A. L., 1965. A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4:4, 259-277.
4. Baybars, I., 1986. An efficient heuristic method for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 24:1, 149-166.
5. Becker, C.; Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.
6. Bowman, E. H., 1960. Assembly-line balancing by linear programming. *Operations Research*, Vol. 8, No. 3, pp. 385-389.
7. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2007a. A classification of assembly line balancing problems. *European Journal of Operational Research* 183, 674-693.
8. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2007b. Assembly line balancing: which model to use when? *International Journal of Production Economics*.
9. Bryton, B., 1954. Balancing of a continuous production line. MS thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, Department of Mechanical Engineering.
10. Buxey, G. M.; Slack, N. D.; Wild, R., 1973. Production flow line system design: a review. *IIE Transactions* 5:1, 37-48.
11. Carnahan, B. J.; Norman, B. A.; Redfern, M. S., 2001. Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing. *IIE Transactions* 33 (10), 875-887.
12. Carter, J. C.; Silverman, F. N., 1984. A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management* 4:2, 145-157.
13. Cohen, Y.; Dar-El, M. E., 1998. Optimizing the number of stations in assembly lines under learning for limited production. *Production Planning and Control* 9 (3), 230-240.
14. Corominas, A.; Pastor, R., 2009. A MILP model for the Visibility Windows Assembly Line Balancing Problem (VWALBP): the case of the Müller-Hannemann & Weihe problem, Documento de Trabajo IOC-DT-P-2009-09. Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales, UPC; diciembre 2009.
15. Dailami, F.; Redford, A., 1998. Twin-arm manipulator system for the assembly of large products. *Assembly Automation* 18 (1), 48-56.
16. Duta, L.; Filip, F. Gh.; Henrioud, J. M., 2005. Applying equal piles approach to disassembly line balancing problem. *IFAC*.
17. Erel, E.; Sarin, S. C., 1998. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control* 9:5, 414-434.
18. Falkenauer, E., 2005. Line balancing in the real world. *International Conference on Product Lifecycle Management*.
19. Ghosh, S.; Gagnon, R. J., 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research* 27:4, 637-670.
20. Gungor, A.; Gupta, S. M.; Pochampally, K.; Kamarthi, S. V., 2000. Complications in disassembly line balancing. Working Paper. Department of Industrial Engineering. Pamukkale University.
21. Held, M.; Karp, R. M.; Shareshian, R., 1963. Assembly line balancing – dynamic programming with precedence constraints. *Operations Research* Vol. 11, No 3., pp. 442-459.
22. Helgeson, W. B.; Salveson, M. E.; Smith, W. W., 1954. How to balance an assembly line, Technical Report, Carr Press, New Canaan, Conn.
23. Jackson, J. R., 1956. A computer procedure for a line balancing problem. *Management Science*, Vol. 2, No. 3, pp. 261-271.
24. Johnson, R. V., 1981. Assembly line balancing algorithms: computation comparisons. *International Journal of Production Research* 19:3, 277-287.
25. Müller-Hannemann, M., 2006. Algorithmic approaches for two fundamental optimization problems: workload-balancing and planar Steiner trees. Tesis doctoral. Technische Universität Darmstadt.
26. Müller-Hannemann, M.; Weihe, K., 2006. Moving policies in cyclic assembly line scheduling. *Theoretical Computer Science* 351, 425-436.
27. Reeve, N. R.; Thomas, W. H., 1973. Balancing stochastic assembly lines. *IIE Transactions* 5:3, 223-229.

28. Rekiek, B.; Dolgui, A.; Delchambre, A.; Bratcu, A., 2002. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control* 26, 163-174.
29. Roberts, S. D.; Villa, C. D., 1970. On a multiproduct assembly line balancing problem. *IIE Transactions* 2:4, 361-364.
30. Salveson, M. E., 1955. The assembly line balancing problem. *The Journal of Industrial Engineering* 6 (3), 18-25.
31. Sarker, B. R.; Shantikumar, J. G., 1983. A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research* 21:1, 109-133.
32. Scholl, A.; Fliedner, M.; Boysen, N., 2008. ABSALOM: Balancing assembly lines with assignment restrictions. Working and Discussion Paper Series. School of Economics and Business Administration. Friedrich-Schiller-University Jena.
33. Sphicas, G. P.; Silverman, F. N., 1976. Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing. *IIE Transactions* 8:2, 280-282.
34. Tazari, S.; Müller-Hannemann, M.; Weihe, K., 2006. Workload balancing in multi-stage production processes. C. Álvarez and M. Serna (Eds.): WEA 2006, LNCS 4007, pp. 49-60, 2006. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
35. Vrat, P.; Virani, A., 1976. A cost model for optimal mix of balanced stochastic assembly line and the modular assembly system for a customer oriented production system. *International Journal of Production Research* 14:4, 445-463.
36. Wallace, G.; Sackett, P., 1996. Integrated design for low production volume, large, complex products. *Integrated Manufacturing Systems* 7 (3), 5-16.
37. White, W. W., 1961. Comments on a paper by Bowman. *Operations Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 274-276.

Apéndice A1: Referencias sobre líneas mixtas

1. Aigbedo, H.; Monden, Y., 1996. A simulation analysis for two-level sequence-scheduling for just-in-time (JIT) mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 34, 3107-3124.
2. Aigbedo, H.; Monden, Y., 1997. A parametric procedure for multi-criterion sequence scheduling for just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 35, 2543-2564.
3. Anderson, S.W., 1995. Measuring the impact of product mix heterogeneity on manufacturing overhead cost. *The Accounting Review* 70, 363-387.
4. Askin, R.G.; Zhou, M., 1997. A parallel station heuristic for the mixed-model production line balancing problem. *International Journal of Production Research* 35, 3095-3105.
5. Bard, J.F.; Dar-El, E.M.; Shtub, A., 1992. An analytic framework for sequencing mixed model assembly lines. *International Journal of Production Research* 30, 35-48.
6. Bard, J.F.; Shtub, A.; Joshi, S.B., 1994. Sequencing mixed-model assembly lines to level parts usage and minimize line length. *International Journal of Production Research* 32, 2431-2454.
7. Bautista, J.; Cano, J., 2008. Minimizing work overload in mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics* 112, 177-191.
8. Bock, S., 2006. A new mixed-model assembly line planning approach for an efficient variety steering integration. Blecker, T.; Friedrich, G. (eds.): *Mass customization: Challenges and solutions*. Springer, New York, 187-210.
9. Bock, S., 2008. Using distributed search methods for balancing mixed-model assembly lines in the automotive industry. *OR Spectrum* 30, 551-578.
10. Bock, S.; Rosenberg, O.; van Brackel, T., 2006. Controlling mixed-model assembly lines in real-time by using distributed systems. *European Journal of Operational Research* 168, 880-904.
11. Bolat, A.; Savsar, M.; Al-Fawzan, M.A., 1994. Algorithms for real-time scheduling of jobs on mixed model assembly lines. *Computers & Operations Research* 21, 487-498.
12. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2008. Sequencing mixed-model assembly lines to minimize part inventory cost. *Operations Research Spectrum* 30, 611-633.
13. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2009. Level scheduling of mixed-model assembly lines under storage constraints. *International Journal of Production Research* 47, 2669-2684.
14. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2009. Production planning of mixed-model assembly lines: Overview and extensions. *Production Planning and Control*.
15. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2009. Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research* 192, 349-373.
16. Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A., 2009. The product rate variation problem and its relevance in real world mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research* 197, 818-824.

17. Bukchin, J., 1998. A comparative study of performance measures for throughput of a mixed model assembly line in a JIT environment. *International Journal of Production Research* 36, 2669-2685.
18. Bukchin, J.; Dar-El, E.M.; Rubinovitz, J., 2002. Mixed model assembly line design in a make-to-order environment. *Computers and Industrial Engineering* 41, 405-421.
19. Bukchin, Y.; Rabinowitch, I., 2006. A branch-and-bound based solution approach for the mixed-model assembly line-balancing problem for minimizing stations and task duplication costs. *European Journal of Operational Research* 174, 492-508.
20. Caridi, M.; Sianesi, A., 2000. Multi-agent systems in production planning and control: An application to the scheduling of mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics* 68, 29-42.
21. Chakravarty, A.K.; Shtub, A., 1985. Balancing mixed model lines with in-process inventories. *Management Science* 31, 1161-1174.
22. Chakravarty, A.K.; Shtub, A., 1986. A cost minimization procedure for mixed model production lines with normally distributed task times. *European Journal of Operational Research* 23, 25-36.
23. Cheng, L.; Ding, F.-Y., 1996. Modifying mixed-model assembly line sequencing methods to consider weighted variations for just-in-time production systems. *IIE Transactions* 28, 919-927.
24. Dar-El, E.M., 1978. Mixed-model assembly line sequencing problems. *Omega. The International Journal of Management Science* 6, 313-323.
25. Dar-El, E.M.; Cothier, R.F., 1975. Assembly line sequencing for model mix. *International Journal of Production Research* 13, 463-477.
26. Dar-El, E.M.; Cucuy, S., 1977. Optimal mixed-model sequencing for balanced assembly lines. *Omega. The International Journal of Management Science* 5, 333-342.
27. Dar-El, E.M.; Nadivi, A., 1981. A mixed-model sequencing application. *International Journal of Production Research* 19, 69-84.
28. Decker, M., 1981. Planning of buffers within mixed-model lines. *Operations Research Spectrum* 14, 201-209.
29. Decker, M., 1993. Capacity smoothing and sequencing for mixed-model lines. *International Journal of Production Economics* 30-31, 31-42.
30. Ding, F.-Y.; Cheng, L., 1993. A simple sequencing algorithm for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Operations Research Letters* 13, 27-35.
31. Ding, F.-Y.; Cheng, L., 1993. An effective mixed-model assembly line sequencing heuristic for Just-in-Time production systems. *Journal of Operations Management* 11, 45-50.
32. Ding, F.-Y.; Zhu, J.; Sun, H., 2006. Comparing two weighted approaches for sequencing mixed-model assembly lines with multiple objectives. *International Journal of Production Economics* 102, 108-131.
33. Drexl, A.; Kimms, A., 1997. Sequencing JIT mixed-model assembly lines under station load- and part usage- constraints. *Management Science* 47, 480-491.
34. Duplaga, E.; Bragg, D., 1998. Mixed-model assembly line sequencing heuristics for smoothing component parts usage: A comparative analysis. *International Journal of Production Research* 36, 2209-2224.
35. Emde, S.; Boysen, N.; Scholl, A., 2008. Balancing mixed-model assembly lines: A computational evaluation of objectives to smoothen workload. *International Journal of Production Research*.
36. Erel, E.; Gokcen, H., 1999. Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 116, 194-204.
37. Flidner, M.; Boysen, N.; Scholl, A., 2008. Solving symmetric mixed-model multi-level just-in-time scheduling problems. *Jena Research Papers in Business and Economics* 18/2008, FSU Jena.
38. Gokcen, H.; Erel, E., 1997. A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem. *International Journal of Production Economics* 48, 177-185.
39. Gokcen, H.; Erel, E., 1998. Binary integer formulation for mixed-model assembly line balancing problem. *Computers and Industrial Engineering* 23, 451-461.
40. Gronalt, M.; Hartl, R.F., 2000. Worker and floater time allocation in a mixed-model assembly line. *POM Working Paper 4/2000*, Universität Wien.
41. Haq, A.N.; Jayaprakash, J.; Rengarajan, K., 2006. A hybrid genetic algorithm approach to mixed-model assembly line balancing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28, 337-341.
42. Inman, R.R.; Bulfin, R.L., 1991. Sequencing JIT mixed-model assembly lines. *Management Science* 37, 901-904.
43. Inman, R.R.; Bulfin, R.L., 1992. Quick and dirty sequencing for mixed-model multi-level JIT systems. *International Journal of Production Research* 30, 2011-2018.

44. Kara, Y.; Özcan, U.; Peker, A., 2007. An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32, 1218-1231.
45. Kara, Y.; Özcan, U.; Peker, A., 2007. Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives. *Applied Mathematics and Computation* 184, 566-588.
46. Karabati, S.; Sayin, S., 2003. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research* 149, 417-429.
47. Kim, Y.K.; Hyun, C.J.; Kim, Y., 1996. Sequencing in mixed model assembly lines: A genetic algorithm approach. *Computers & Operations Research* 23, 1131-1145.
48. Kim, Y.K.; Kim, J.Y.; Kim, Y., 2000. A coevolutionary algorithm for balancing and sequencing in mixed model assembly lines. *Applied Intelligence* 13, 247-258.
49. Kim, Y.K.; Kim, S.J.; Kim, J.Y., 2000. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning and Control* 11, 754-764.
50. Kim, Y.K.; Kim, J.Y.; Kim, Y., 2006. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research* 168, 838-852.
51. Klampfl, E.; Gusikhin, O.; Rossi, G., 2006. Optimization of workcell layouts in a mixed-model assembly line environment. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17, 277-300.
52. Korkmazel, T.; Meral, S., 2001. Bicriteria sequencing methods for the mixed-model assembly line in just-in-time production systems. *European Journal of Operational Research* 131, 188-207.
53. Kotani, S.; Ito, T.; Ohno, K., 2004. Sequencing problem for a mixed-model assembly line in the Toyota production system. *International Journal of Production Research* 42, 4955-4974.
54. Kubiak, W.; Steiner, G.; Yeomans, J.S., 1997. Optimal level schedules for mixed-model, multi-level just-in-time assembly systems. *Annals of Operations Research* 69, 241-259.
55. Kurashige, K.; Yanagawa, Y.; Miyazaki, S.; Kameyama, Y., 2002. Time-based goal chasing method for mixed-model assembly line problem with multiple work stations. *Production Planning and Control* 13, 735-745.
56. Leu, Y.; Matheson, L.; Rees, L., 1996. Sequencing mixed model assembly line with genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering* 30, 1027-1036.
57. Leu, Y.; Huang, P.; Russell, R., 1997. Using beam search techniques for sequencing mixed-model assembly lines. *Annals of Operations Research* 70, 379-397.
58. Lovgren, R.H.; Racer, M.J., 2000. Algorithms for mixed-model sequencing with due date restrictions. *European Journal of Operational Research* 120, 408-422.
59. Macaskill, J. L. C., 1972. Production-line balances for mixed-model lines. *Management Science* 19, 423-434.
60. Macaskill, J., 1973. Computer simulation for mixed-model production lines. *Management Science* 20, 341-348.
61. Matanachai, S.; Yano, C. A., 2004. Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload. *IIE Transactions* 33, 29-42.
62. McMullen, P.R., 2001. A Kohonen self-organizing map approach to addressing a multiple objective, mixed-model JIT sequencing problem. *International journal of production economics*. - Amsterdam [u.a.]: Elsevier 72, 59-71.
63. McMullen, P. R.; Frazier, G. V., 1997. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel workstations. *International Journal of Production Economics* 51, 177-190.
64. McMullen, P.R.; Frazier, G.V., 2000. A simulated annealing approach to mixed-model sequencing with multiple objectives on a just-in-time line. *IIE transactions // Institute of Industrial Engineers* 32, 679-686.
65. Merengo, C.; Nava, F.; Pozzetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835-2860.
66. Miltenburg, J., 1989. Level schedules for mixed-model assembly lines in just-in-time production systems. *Management Science* 35, 192-207.
67. Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14, 119-151.
68. Miltenburg, J.; Sinnamon, G., 1989. Scheduling mixed-model multi-level just-in-time production systems. *International Journal of Production Research* 27, 1487-1509.
69. Miltenburg, J.; Sinnamon, G., 1995. Revisiting the mixed-model multi-level just-in-time scheduling problem. *International Journal of Production Research* 33, 2049-2052.
70. Miltenburg, J.; Steiner, G.; Yeomans, S., 1990. A dynamic programming algorithm for scheduling mixed-model, just-in-time production systems. *Mathematical and Computer Modelling* 13, 57-66.

71. Mitsumori, S.; Takada, K., 1972. Optimum schedule control of conveyer line in mixed production. *Electrical Engineering in Japan* 92, 167-175.
72. Ng, W.C.; Mak, K.L., 1994. A branch and bound algorithm for scheduling just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Economics* 33, 169-183.
73. Ponnambalam, S.G.; Aravindan, P.; Rao, M.S., 2003. Genetic algorithms for sequencing problems in mixed model assembly lines. *Computers & Industrial Engineering* 45, 669-690.
74. Sahgal, V.K., 1970. A mixed model sequencing algorithm. *Thesenarbeit*, 1-113.
75. Scholl, A.; Klein, R.; Domschke, W., 1998. Pattern based vocabulary building for effectively sequencing mixed model assembly lines. *Journal of Heuristics* 4, 359-381.
76. Sianesi, A., 1998. An analysis of the impact of plant and management variables in a multi-stage, mixed-model production system. *International journal of production economics*. - Amsterdam [u.a.]: Elsevier 56/57, 575-585.
77. Simaria, A. S.; Vilarinho, P. M., 2004. A genetic algorithm based approach to the mixed-model assembly line balancing problem of type II. *Computers and Industrial Engineering* 47, 391-407.
78. Sparling, D.; Miltenburg, J., 1998. The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research* 36, 485-501.
79. Steiner, G.; Yeomans, J.S., 1993. Level schedules for mixed-model, just-in-time processes. *Management Science* 39, 728-735.
80. Steiner, G.; Yeomans, J.S., 1996. Optimal level schedules in mixed-model, multi-level JIT assembly systems with pegging. *European Journal of Operational Research* 95, 38-52.
81. Suliman, S.M.A.; Al Tamini, A.M.; Nawara, G.M., 1985. Computational methods for the mixed-model assembly line problem: a review. *J.Eng.Science, Kind Saud Univ.* 11, 241-271.
82. Sumichrast, R.T.; Clayton, E.R., 1996. Evaluating sequences for paced, mixed-model assembly lines with JIT component fabrication. *International Journal of Production Research* 34, 3125-3143.
83. Sumichrast, R.T.; Russell, R.S., 1990. Evaluating mixed-model assembly line sequencing heuristics for just-in-time production systems. *Journal of Operations Management* 9, 371-390.
84. Sumichrast, R.T.; Russell, R.S.; Taylor, B.W., 1992. A comparative analysis of sequencing procedures for mixed-model assembly lines in an just-in-time production system. *International Journal of Production Research* 30, 199 - 214.
85. Thomopoulos, N.T., 1967. Line balancing-sequencing for mixed-model assembly. *Management Science* 14, B59-B75.
86. Thomopoulos, N.T., 1970. Mixed model line balancing with smoothed station assignment. *Management Science* 16, 593-603.
87. Thomopoulos, N.T.; Lehman, M., 1969. The mixed model learning curve. *AIIE Transactions* 1, 127-132.
88. Tiacci, L.; Saetta, S.; Martini, A., 2006. Balancing Mixed-Model Assembly Lines with Parallel Workstations through a Genetic Algorithm Approach. *International Journal of Industrial Engineering - Theory, Applications and Practice*, 13(4), 402-411.
89. Van Hop, N., 2006. A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 168, 798-810.
90. Ventura, J.A.; Radhakrishnan, S., 2002. Sequencing mixed model assembly lines for a Just-In-Time production system. *Production Planning and Control* 13, 199-210.
91. Vilarinho, P.M.; Simaria, A.S., 2002. A two-stage heuristic method for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 40, 1405-1420.
92. Vilarinho, P.M.; Simaria, A.S., 2006. ANTBAL: An ant colony optimization algorithm for balancing mixed-model assembly lines with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 44, 291-303.
93. Wang, F.; Wilson, R.C., 1986. Comparative analysis of fixed and removable item mixed model assembly lines. *IIE Transactions*, 313-317.
94. Xiaobo, Z.; Zhou, Z., 1999. Algorithms for Toyota's goal of sequencing mixed models on an assembly line with multiple workstations. *Journal of Operational Research Society* 50, 704-710.
95. Zeramdini W.; Aigbedo H.; Monden Y., 2000. Bicriteria sequencing for just-in-time mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 38, 3451-3470.
96. Zhang, Y.; Luh, P.B.; Yoneda, K.; Kano, T.; Kyoya, Y., 2000. Mixed-model assembly line scheduling using the Lagrangian relaxation technique. *IIE transactions // Institute of Industrial Engineers* 32, 125-134.
97. Zhao, X.; Liu, J.; Ohno, K.; Kotani, S., 2007. Modeling and analysis of a mixed-model assembly line with stochastic operation times. *Naval Research Logistics* 54, 681-691.

98. Zhao, X.; Ohno, K.; Lau, H.-S., 2004. A balancing problem for mixed model assembly lines with a paced moving conveyor. *Naval Research Logistics* 51, 446-464.
99. Zhu, J.; Ding, F., 2000. A transformed two-stage method for reducing the part-usage variation and a comparison of the product-level and part-level solutions in sequencing mixed-model assembly lines. *European Journal of Operational Research* 127, 203-216.

Apéndice A2: Referencias sobre líneas multiproducto

1. Aneke, N.A.G.; Carrie, A.S., 1986. A design technique for the layout of multi-product flowlines. *International Journal of Production Research* 24, 471-481.
2. Berger, I.; Bourjolly, J.; Laporte, G., 1992. Branch-and-bound algorithms for the multi-product assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 58, 215-222.
3. de Matta, R., 1994. A Lagrangean decomposition solution to a single line multiproduct scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 79, 25-37.
4. Donath, M.; Graves, R.J., 1989. Flexible assembly systems: test results for an approach for near real-time scheduling and routing of multiple products. *International Journal of Production Research* 27, 215-227.
5. Donath, M.; Graves, R.J.; Carlson, D.A., 1988. Flexible assembly systems: The scheduling problem for multiple products. *Journal of Manufacturing Systems* 8, 27-34.
6. Graves, S.C.; Redfield, H.C., 1988. Equipment selection and task assignment for multiproduct assembly system design. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 1, 31-50.
7. McMullen, P.R.; Tarasewich, P.; Frazier, G.V., 2000. Using genetic algorithms to solve the multi-product JIT sequencing problem with set-ups. *International Journal of Production Research* 38, 2653-2670.
8. Pastor, R.; Andrés, C.; Durán, A.; Pérez, M., 2002. Tabu search algorithms for an industrial multi-product and multi-objective assembly line balancing problem, with reduction of the task dispersion. *Journal of the Operational Research Society* 53, 1317-1323.
9. Roberts, S.D.; Villa, C.D., 1970. On a multiproduct assembly line-balancing problem. *AIIE Transactions* 2, 361-364.
10. Wilhelm, W.E.; Gadidov, R., 2004. A branch-and-cut approach for a generic multiple-product, assembly-system design problem. *INFORMS Journal on Computing* 16, 39-55.

Apéndice A3: Referencias sobre líneas monoproducto

1. Anderson, E. J.; Ferris, M. C., 1994. Genetic algorithms for combinatorial optimization: the assembly line balancing problem. *ORSA Journal on Computing* 6, 161-173.
2. Arcus, A. L., 1963. An analysis of a computer method of sequencing assembly line operations. PhD dissertation, University of California, Berkeley.
3. Arcus, A. L., 1966. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 259-277.
4. Balas, E., 1965. An additive algorithm for solving linear programs with zero-one variables. *Operations Research* 13, 517-546.
5. Baybars, I., 1986a. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem. *Management Science* 32, 909-932.
6. Baybars, I., 1986b. An efficient heuristic method for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 24, 149-166.
7. Bennett, G. B.; Byrd, J., 1976. A trainable heuristic procedure for the assembly line balancing problem. *AIIE Transactions* 8, 195-201.
8. Betts, J.; Mahmoud, K. I., 1989. A method for assembly line balancing. *Engineering Costs and Production Economics* 18, 55-64.
9. Bhattacharjee, T.; Sahu, S., 1990. Complexity of single model assembly line balancing problems. *Engineering Costs and Production Economics* 18, 203-214.
10. Bock, S.; Rosenberg, O., 1998. A new distributed fault-tolerant algorithm for the simple assembly line balancing problem. In: Kischka, P. et al. (Eds.), *Operations Research Proceedings 1997*. Springer, Berlin, pp. 474-480.
11. Boctor, F. F., 1995. A multiple-rule heuristic for assembly line balancing. *Journal of the Operational Research Society* 46, 62-69.
12. Bowman, E. H., 1960. Assembly line balancing by linear programming. *Operations Research*, 8(3), 385-389.
13. Buxey, G. M.; Slack, N. D.; Wild, R., 1973. Production flow line system design - A review. *AIIE Transactions* 5, 37-48.

14. Chiang, W.-C., 1998. The application of a tabu search metaheuristic to the assembly line balancing problem. *Annals of Operations Research* 77, 209-227.
15. Dar-El, E. M., 1973. MALB-A heuristic technique for balancing large single-model assembly lines. *AIIE Transactions*, 5(4), 343-356.
16. Dar-El, E.M., 1975. Solving large single-model assembly line balancing problems - a comparative study. *AIIE Transactions* 7, 302-310.
17. Dar-El, E.M.; Rubinovitch, Y., 1979. MUST - A multiple solutions technique for balancing single model assembly lines. *Management Science* 25, 1105-1114.
18. De Reyck, B.; Herroelen, W., 1997. Assembly-line balancing by resource-constrained project-scheduling - A critical appraisal. *Foundations of Computing and Control Engineering* 22, 143-167.
19. Erel, E., 1987. A methodology to solve single-model, stochastic assembly line balancing problem and its extensions. Unpublished doctoral dissertation.
20. Erel, E.; Sarin, S. C., 1998. A survey of the assembly line balancing procedures. *Production Planning and Control* 9, 414-434.
21. Falkenauer, E., 1996. A hybrid grouping algorithm for bin packing. *Journal of Heuristics* 2, 5-30.
22. Fleszar, K.; Hindi, K. S., 2003. An enumerative heuristic and reduction methods for the assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 145, 606-620.
23. Freeman, D. S.; Swain, R. W., 1986. A heuristic technique for balancing automated assembly lines. Research Report No. 86-6, Industrial and Systems Engineering Department, University of Florida, Gainesville.
24. Gadidov, R.; Wilhelm, W.E., 2000. A cutting plane approach for the single-product assembly system design problem. *International Journal of Production Research* 38, 1731-1754.
25. Gehrelein, W. V.; Patterson, J. H., 1975. Sequencing for assembly lines with integer task times. *Management Science* 21, 1064-1070.
26. Gehrelein, W. V.; Patterson, J. H., 1978. Balancing single model assembly lines: Comments on a paper by E. M. Dar-El (Mansoor). *AIIE Transactions* 10, 109-112.
27. Ghosh, S.; Gagnon, R. J., 1989. A comprehensive literature review and analysis of the design, balancing and scheduling of assembly systems. *International Journal of Production Research* 27, 637-670.
28. Hackman, S. T.; Magazine, M. J.; Wee, T. S., 1989. Fast, effective algorithms for simple assembly line balancing problems. *Journal of Operational Research* 37, 916-924.
29. Held, M.; Karp, R. M.; Shareshian, R., 1963. Assembly line balancing - Dynamic programming with precedence constraints. *Operations Research* 11, 442-459.
30. Helgeson, W. P.; Birnie, D. P., 1961. Assembly line balancing using the ranked positional weight technique. *Journal of Industrial Engineering* 12:6, 394-398.
31. Hoffmann, T. R., 1963. Assembly line balancing with a precedence matrix. *Management Science* 9, 551-562.
32. Hoffmann, T. R., 1992. EUREKA: A hybrid system for assembly line balancing. *Management Science* 38, 39-47.
33. Hoffmann, T. R., 1993. Response to note on microcomputer performance of "FABLE" on Hoffmann's data sets. *Management Science* 39, 1192-1193.
34. Jackson, J. R., 1956. A computing procedure for a line balancing problem. *Management Science* 2, 261-271.
35. Johnson, R. V., 1981. Assembly line balancing algorithms: computation comparisons. *International Journal of Production Research* 19, 277-287.
36. Johnson, R. V., 1988. Optimally balancing large assembly lines with "FABLE". *Management Science* 34, 240-253.
37. Johnson, R. V., 1993. Note: Microcomputer performance of "FABLE" on Hoffmann's data sets. *Management Science* 39, 1190-1193.
38. Kilbridge, M. D.; Wester, L., 1961. A heuristic method of assembly line balancing. *The Journal of Industrial Engineering* 12:4, 292-298.
39. Kilincci, O.; Bayhan, G. M., 2006. A Petri net approach for simple assembly line balancing problems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30, 1165-1173.
40. Kilincci, O.; Bayhan, G. M., 2008. A P -invariant-based algorithm for simple assembly line balancing problem of type-1. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 37, 400-409.
41. Klein, R.; Scholl, A., 1996. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research* 91, 367-385.
42. Liu, S.B.; Ng, K.M.; Ong, H.L., 2006. Branch-and-bound algorithms for simple assembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9.

43. Moodie, C. L.; Young, H. H., 1965. A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering* 16, 23-29.
44. Nourie, F. J.; Venta, E. R., 1991. Finding optimal line balances with OptPack. *Operations Research Letters* 10, 165-171.
45. Nourie, F. J.; Venta, E. R., 1996. Microcomputer performance of OptPack on Hoffmann's data sets: comparisons with EUREKA and FABLE. *Management Science* 42, 304-306.
46. Pastor, R.; Ferrer, L., 2008. An improved mathematical program to solve the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research*.
47. Pastor, R.; Ferrer, L.; García, A., 2007. Evaluating optimization models to solve SALBP. *Lecture Notes in Computer Science* 4705, 791-803.
48. Peeters, M.; Degraeve, Z., 2006. A linear programming based lower bound for the simple assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 168, 716-731.
49. Pinnoi, A.; Wilhelm, W. E., 1997a. A branch and cut approach for workload smoothing on assembly lines. *INFORMS Journal on Computing* 9, 335-350.
50. Pinnoi, A.; Wilhelm, W. E., 1997b. A family of hierarchical models for assembly system design. *International Journal of Production Research* 35, 253-280.
51. Pinnoi, A.; Wilhelm, W. E., 1998. Assembly system design: a branch and cut approach. *Management Science* 44, 103-118.
52. Pinto, P. A.; Dannenbring, D.G.; Khumawala, B. M., 1978. A heuristic network procedure for the assembly line balancing problem. *Naval Research Logistics Quarterly* 25, 299-307.
53. Ponnambalam, S.; Aravindan, G.; Mogileeswar Naidu, G., 2000. A multi-objective genetic algorithm for solving assembly line balancing problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 16, 341-352.
54. Rachamadugu, R.; Talbot, B., 1991. Improving the equality of workload assignments in assembly lines. *International Journal of Production Research* 29, 619-633.
55. Raouf, A.; Tsui, C. L.; El-Sayed, E. A., 1980. A new heuristic approach to assembly line balancing. *Computers and Industrial Engineering* 4, 223-234.
56. Rekiek, B.; Dolgui, A.; Delchambre, A.; Bratcu, A., 2002b. State of art of optimization methods for assembly line design. *Annual Reviews in Control* 26, 163-174.
57. Rosenblatt, M. J.; Carlson, R. C., 1985. Designing a production line to maximize profit. *IIE Transactions* 17, 117-121.
58. Sabuncuoglu, I.; Erel, E.; Tanyer, M., 2000. Assembly line balancing using genetic algorithms. *Journal of Intelligent Manufacturing* 11, 295-310.
59. Saltzman, M.J.; Baybars, I., 1987. A two-process implicit enumeration algorithm for the simple assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 32, 118-129.
60. Salveson, M., 1955. The assembly line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering*, 18-25.
61. Sarin, S.C.; Erel, E., 1990. Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 28, 1305-1316.
62. Sarin, S.C.; Erel, E.; Dar-El, E.M., 1999. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega* 27, 525-535.
63. Schofield, N. A., 1979. Assembly line balancing and the application of computer techniques. *Computers and Industrial Engineering* 3, 53-69.
64. Scholl, A.; Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 666-693.
65. Scholl, A.; Klein, R., 1997. SALOME: A bidirectional branch and bound procedure for assembly line balancing. *INFORMS Journal on Computing* 9, 319-334.
66. Scholl, A.; Klein, R., 1999. Balancing assembly lines effectively - A computational comparison. *European Journal of Operational Research* 114, 50-58.
67. Scholl, A.; Voß, S., 1996. Simple assembly line balancing - Heuristic approaches. *Journal of Heuristics* 2, 217-244.
68. Shtub, A.; Dar-El, E. M., 1989. A methodology for the selection of assembly systems. *International Journal of Production Research* 27, 175-186.
69. Sprecher, A., 1999. A competitive branch-and-bound algorithm for the simple assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 37, S. 1787-1816.
70. Sprecher, A., 2003. Dynamic search tree decomposition for balancing assembly lines by parallel search. *International Journal of Production Research* 41, 1413-1430.
71. Suresh, G.; Sahu, S., 1994. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research* 32, 1801-1810.
72. Talbot, F. B.; Patterson, J. H., 1984. An integer programming algorithm with network cuts for solving the assembly line balancing problem. *Management Science* 30, 85-99.

73. Talbot, F. B.; Patterson, J. H.; Gehrlein, W. V., 1986. A comparative evaluation of heuristic line balancing techniques. *Management Science* 32, 430-454.
74. Tasan, S.Ö.; Tunali, S., 2006. Improving the Genetic Algorithms performance in simple assembly line balancing. In: Gavrilova, M.; Gervasi, O.; Kumar, V.; Tan, C.J.K.; Taniar, D.; Laganà, A.; Mun, Y.; Choo, H. (eds.): *Computational science and its applications - ICCSA 2006*. Springer, Berlin, Heidelberg, 78-87.
75. Tonge, F. M., 1960. Summary of a heuristic line balancing procedure. *Management Science* 7, 21-39.
76. Tonge, F. M., 1961. *A heuristic program of assembly line balancing*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
77. Tonge, F. M., 1965. Assembly line balancing using probabilistic combinations of heuristics. *Management Science* 11, 727-735.
78. Ugurdag, H. F.; Rachamadugu, R.; Papachristou, C. A., 1997. Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research* 102, 488-501.
79. Van Assche, F.; Herroelen, W., 1979. An optimal procedure for the single-model deterministic assembly line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 3, 142-149.
80. Watanabe, T.; Hashimoto, Y.; Nishikawa, L.; Tokumaru, H., 1995. Line balancing using a genetic evolution model. *Control Engineering Practice* 3, 69-76.
81. Wee, T. S.; Magazine, M. J., 1982. Assembly line balancing as generalized bin packing. *Operations Research Letters* 1/2, 56-58.
82. Whitehouse, G.E.; Washburn, D., 1980. Solve simple assembly line balance problems. *Industrial Engineering* 9, 22-25.

Apéndice A4: Referencias sobre movimiento de la línea continuo

1. Arcus, A.L., 1966. A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 259-277.
2. Becker, C.; Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.
3. Bolat, A.; Yano, C., 1992. A surrogate objective for utility work in paced assembly lines. *Production Planning & Control* 3, 406-412.
4. Bolat, A.; Yano, C., 1992. Scheduling algorithms to minimize utility work at a single station on a paced assembly line. *Production Planning & Control* 3, 393-405.
5. Buxey, G.; Sadjadi, D., 1976. Simulation studies of conveyor-paced lines with buffer capacity. *International Journal of Production Research* 14, 607-624.
6. Buxey, G., 1979. The nature of manual, moving belt flowlines with overlapping stations. *International Journal of Production Research* 17, 143-154.
7. Caridi, M.; Cigolini, R.; Farina, V., 2006. Designing unbalanced paced lines: A conceptual model and an experimental campaign. *Production Planning & Control* 17, 464 - 479.
8. Carter, J.C.; Silverman, F.N., 1984. A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management* 4, 145-157.
9. Davis, L., 1965. Pacing effects on manned assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 171-184.
10. Dolgui, A.; Guschinsky, N.; Levin, G., 2006. A special case of transfer lines balancing by graph approach. *European Journal of Operational Research* 168, 732-746.
11. Faaland, B.H.; Klastorin, T.D.; Schmitt, T.G.; Shtub, A., 1992. Assembly line balancing with resource dependent task times. *Decision Sciences* 23, 343 - 364.
12. Gökçen, H. ; Baykoç, Ö.F., 1999. A new line remedial policy for the paced lines with stochastic task times. *International Journal of Production Economics* 58, 191-197.
13. Haider, S.; Moodie, C.L., 1978. An investigation of the use of an interactive computer mode for balancing paced assembly lines. *Computers & Industrial Engineering* 2, 83-89.
14. Klein, R.; Scholl, A., 1996. Maximizing the production rate in simple assembly line balancing - A branch and bound procedure. *European Journal of Operational Research* 91, 367-385.
15. Kottas, J. F.; Lau, H.-S., 1973. A cost-oriented approach to stochastic line balancing. *IIE Transactions* 5, 164-171.
16. Kottas, J. F.; Lau, H.-S., 1976. A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *IIE Transactions* 8, 234-240.
17. Kottas, J. F.; Lau, H., 1981. A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research* 19, 177-193.
18. Lau, H.; Shtub, A., 1987. An exploratory study on stopping a paced line when incompletions occur. *IIE Transactions* 19, 463-467.

19. McCreery, J.K.; Krajewski, L.J.; Leong, G.K.; Ward, P.T., 2004. Performance implications of assembly work teams. *Journal of Operations Management* 22, 387-412.
20. Merengo, C.; Nava, F.; Pozetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835-2860.
21. Miltenburg, J., 2001. One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: A tutorial. *IIE Transactions* 33, 303-321.
22. Sarker, B.R., 1984. Some comparative and design aspects of series production systems. *IIE Transactions* 16, 229-239.
23. Silverman, F.N.; Carter, J.C., 1986. A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science* 32, 455-463.
24. Sotskov, Y.N.; Dolgui, A.; Portmann, M.-C., 2006. Stability analysis of an optimal balance for an assembly line with fixed cycle time. *European Journal of Operational Research* 168, 783-797.
25. Suhail, A., 1983. Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research* 21, 627-640.
26. Sumichrast, R.T.; Clayton, E.R., 1996. Evaluating sequences for paced, mixed-model assembly lines with JIT component fabrication. *International Journal of Production Research* 34, 3125-3143.
27. Ugurdag, H.F.; Rachamadugu, R.; Papachristou, C.A., 1997. Designing paced assembly lines with fixed number of stations. *European Journal of Operational Research* 102, 488-501.
28. Yano, C. A.; Bolat, A., 1989. Survey, development, and application of algorithms for sequencing paced assembly lines. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 2, 172-198.
29. Yano, C. A.; Rachamadugu, R., 1991. Sequencing to minimize work overload in assembly lines with product options. *Management Science* 37, 572-586.
30. Zhao, X.; Ohno, K.; Lau, H.-S., 2004. A balancing problem for mixed model assembly lines with a paced moving conveyor. *Naval Research Logistics* 51, 446-464.

Apéndice A5: Referencias sobre movimiento de la línea intermitente

1. Becker, C.; Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.
2. Buzacott, J.A., 1990. Abandoning the moving assembly line: models of human operators and job sequencing. *International Journal of Production Research* 28, 821-839.
3. Davis, L., 1965. Pacing effects on manned assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 171-184.
4. Hillier, F. S.; Boling, W., 1979. On the optimal allocation of work in symmetrically unbalanced production line systems with variable operations times. *Management Science* 25, 721-728.
5. Johnson, R.V., 1983. A branch and bound algorithm for assembly line balancing problems with formulation irregularities. *Management Science* 29, 1309-1324.
6. Karabati, S.; Sayin, S., 2003. Assembly line balancing in a mixed-model sequencing environment with synchronous transfers. *European Journal of Operational Research* 149, 417-429.
7. Kouvelis, P.; Karabati, S., 1999. Cyclic scheduling in synchronous production lines. *IIE Transactions* 31, 709-719.
8. Martin, G.E., 1994. Optimal design of production lines. *International Journal of Production Research* 32, 989-1000.
9. Merengo, C.; Nava, F.; Pozetti, A., 1999. Balancing and sequencing manual mixed-model assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 2835-2860.
10. Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14, 119-151.
11. Pike, R.; Martin, G.E., 1994. The bowl phenomenon in unpaced lines. *International Journal of Production Research* 32, 483-499.
12. Sarker, B.R., 1984. Some comparative and design aspects of series production systems. *IIE Transactions* 16, 229-239.
13. Smunt, T.L.; Perkins, W.C., 1985. Stochastic unpaced line design: Review and further experimental results. *Journal of Operations Management* 5, 351-373.
14. Tempelmeier, H., 2003. Practical considerations in the optimization of flow production systems. *International Journal of Production Research* 41, 149-170.
15. Tempelmeier, H.; Bürger, M., 2001. Performance evaluation of unbalanced flow lines with general distributed processing times, failures and imperfect production. *IIE Transactions* 33, 293-302.
16. Urban, T.L.; Chiang, W.-C., 2006. Balancing unpaced synchronous production lines. Working Paper, University of Tulsa, Oklahoma, USA.

Apéndice A6: Referencias sobre disposición de la línea en forma de U *

1. Aase, G.R.; Olson, J.R.; Schniederjans, M.J., 2004. U-shaped assembly line layouts and their impact on labor productivity: An experimental study. *European Journal of Operational Research* 156, 698-711.
2. Aase, G.R.; Schniederjans, M.J.; Olson, J.R., 2003. U-OPT: An analysis of exact U-shaped line balancing procedures. *International Journal of Production Research* 41, 4185-4210.
3. Agpak K.; Gökçen H., 2007. A chance-constrained approach to stochastic line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 180, 1098-1115.
4. Baykasoglu, A., Özbakir, L., 2007. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32, 139-147.
5. Becker, C.; Scholl, A., 2006. A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 168, 694-715.
6. Boysen, N.; Fliedner, M., 2008. A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 184, 39-55.
7. Chiang, W.-C.; Urban, T.L., 2002. A hybrid heuristic for the stochastic U-line balancing problem. Working Paper, University of Tulsa, Oklahoma, USA.
8. Erel, E.; Sabuncuoglu, I.; Sekerci, H., 2005. Stochastic assembly line balancing using beam search. *International Journal of Production Research* 43, 1411-1426.
9. Gökçen, H.; Agpak, K., 2006. A goal programming approach to simple U-line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 171, 577-585.
10. Kara, Y.; Özcan, U.; Peker, A., 2007. An approach for balancing and sequencing mixed-model JIT U-lines. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32, 1218-1231.
11. Kara, Y.; Özcan, U.; Peker, A., 2007. Balancing and sequencing mixed-model just-in-time U-lines with multiple objectives. *Applied Mathematics and Computation* 184, 566-588.
12. Kim, Y.K.; Kim, J.Y.; Kim, Y., 2006. An endosymbiotic evolutionary algorithm for the integration of balancing and sequencing in mixed-model U-lines. *European Journal of Operational Research* 168, 838-852.
13. Kim, Y.K.; Kim, S.J.; Kim, J.Y., 2000. Balancing and sequencing mixed-model U-lines with a co-evolutionary algorithm. *Production Planning and Control* 11, 754-764.
14. Miltenburg, J., 1998. Balancing U-lines in a multiple U-line facility. *European Journal of Operational Research* 109, 1-23.
15. Miltenburg, J., 2001. One-piece flow manufacturing on U-shaped production lines: A tutorial. *IIE Transactions* 33, 303-321.
16. Miltenburg, J., 2002. Balancing and scheduling mixed-model U-shaped production lines. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 14, 119-151.
17. Miltenburg, J.; Wijngaard, J., 1994. The U-line line balancing problem. *Management Science* 40, 1378-1388.
18. Scholl, A.; Klein, R., 1999. ULINO: Optimally balancing U-shaped JIT assembly lines. *International Journal of Production Research* 37, 721-736.
19. Sparling, D., 1998. Balancing JIT production units: The N U-line balancing problem. *Information Systems and Operational Research* 36, 215-237.
20. Sparling, D.; Miltenburg, J., 1998. The mixed-model U-line balancing problem. *International Journal of Production Research* 36, 485-501.
21. Toklu, B.; Özcan, U., 2007. A fuzzy goal programming model for simple U-line balancing problem with multiple objectives. *Engineering Optimization (to appear)*.
22. Urban, T.L., 1998. Note. Optimal balancing of U-shaped assembly lines. *Management Science* 44, 738-741.
23. Urban, T.L.; Chiang, W., 2006. An optimal piecewise-linear program for the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research* 168, 771-782.

* Por su extensión, no se expone una relación análoga de artículos que traten sobre cadenas de ensamblaje dispuestas en línea recta, ya que toda la literatura anterior a 1994 que incorpora formulación matemática sobre líneas de montaje asume esta hipótesis.

Apéndice A7: Referencias sobre el uso de ambos lados de la línea

1. Bartholdi, J., 1993. Balancing two-sided assembly lines: A case study. *International Journal of Production Research* 31, 2447-2461.

2. Baykasoglu, A.; Dereli, T., 2008. Two-sided assembly line balancing using an ant-colony-based heuristic. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 36, 582-588.
3. Hu, X.F.; Wu, E.F.; Jin, Y., 2007. A station-oriented enumerative algorithm for two-sided assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 186, 435-440.
4. Kim, Y. K.; Kim, Y.; Kim, Y.J., 2000. Two-sided assembly line balancing: a genetic algorithm approach. *Production Planning and Control* 11, 44-53.
5. Kim, Y. K.; Song, W. S.; Kim, J. H., 2009. A mathematical model and a genetic algorithm for two-sided assembly line balancing. *Computers and Operations Research* 36, 853-865.
6. Lee, T. O.; Kim, Y.; Kim, Y. K., 2001. Two-sided assembly line balancing to maximize work relatedness and slackness. *Computers & Industrial Engineering* 40, 273-292.
7. Ozcan, U.; Gökçen, H.; Toklu, B., 2009. Balancing parallel two-sided assembly lines. *International Journal of Production Research* (to appear).
8. Ozcan, U.; Toklu, B., 2009. A tabu search algorithm for two-sided assembly line balancing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* 43, 822-829.
9. Ozcan, U.; Toklu, B., 2009. Balancing of mixed-model two-sided assembly lines. *Computers and Industrial Engineering* 57, 217-227.
10. Ozcan, U.; Toklu, B., 2009. Multiple-criteria decision-making in two-sided assembly line balancing: a goal programming and a fuzzy goal programming models. *Computers and Operations Research* 36, 1955-1965.
11. Simaria, A. S.; Vilarinho, P. M., 2009. 2-ANTBAL: An ant colony optimisation algorithm for balancing two-sided assembly lines. *Computers and Industrial Engineering* 56, 489-506.
12. Wu, E.-F.; Jin, Y.; Bao, J.-S.; Hu, X.-F., 2008. A branch-and-bound algorithm for two-sided assembly line balancing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* 39, 1009-1015.

Apéndice A8: Referencias sobre tiempos de tarea estocásticos

1. Baykasoglu, A.; Ozbakir, L., 2007. Stochastic U-line balancing using genetic algorithms. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32, 139-147.
2. Boysen, N.; Fliedner, M., 2008. A versatile algorithm for assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 184, 39-56.
3. Carraway, R. L., 1989. A dynamic programming approach to stochastic assembly line balancing. *Management Science* 35, 459-471.
4. Carter, J. C.; Silverman, F. N., 1984. A cost-effective approach to stochastic line balancing with off-line repairs. *Journal of Operations Management* 4, 145-157.
5. Chiang, W.-C.; Urban, T. L., 2002. A hybrid heuristic for the stochastic U-line balancing problem, Working Paper, University of Tulsa, Oklahoma, USA.
6. Erel, E.; Sabuncuoglu, I.; Sederici, H., 2005. Stochastic assembly line balancing using beam search. *International Journal of Production Research* 43, 1411-1426.
7. Henig, M. I., 1986. Extensions of the dynamic programming method in the deterministic and stochastic assembly line balancing problems. *Computers and Operations Research* 13, 443-449.
8. Hillier, F. S.; So, K. C.; Boling, R. W., 1993. Toward characterizing the optimal allocation of storage space in production line systems with variable processing times. *Management Science* 39, 126-133.
9. Kao, E. P. C., 1976. A preference order dynamic program for stochastic assembly line balancing. *Management Science* 22, 1097-1104.
10. Kao, E. P. C., 1979. Computational experience with a stochastic assembly line balancing algorithm. *Computers and Operations Research* 6, 79-86.
11. Kottas, J. F.; Lau, H.-S., 1973. A cost-oriented approach to stochastic line balancing. *AIIE Transactions* 5, 164-171.
12. Kottas, J. F.; Lau, H.-S., 1976. A total operating cost model for paced lines with stochastic task times. *AIIE Transactions* 8, 234-240.
13. Kottas, J. F.; Lau, H.-S., 1981. A stochastic line balancing procedure. *International Journal of Production Research* 19, 177-193.
14. Lyu, J., 1997. A single-run optimization algorithm for stochastic assembly line balancing problems. *Journal of Manufacturing Systems* 16, 204-210.
15. McMullen, P. R.; Frazier, G. V., 1997. A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. *International Journal of Production Economics* 51, 177-190.

16. McMullen, P. R.; Frazier, G. V., 1998. Using simulated annealing to solve a multiobjective assembly line balancing problem with parallel workstations. *International Journal of Production Research* 36, 2717-2741.
17. McMullen, P. R.; Tarasewich, P., 2003. Using ant techniques to solve the assembly line balancing problem. *IIE Transactions* 35, 605-617.
18. McMullen, P. R.; Tarasewich, P., 2006. Multi-objective assembly line balancing via a modified ant colony optimization technique. *International Journal of Production Research* 44, 27-42.
19. Moodie, C. L.; Young, H. H., 1965. A heuristic method of assembly line balancing for assumptions of constant or variable work element times. *Journal of Industrial Engineering* 16, 23-29.
20. Nkasu, M. M.; Leung, K. H., 1995. A stochastic approach to assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 33, 975-991.
21. Raouf, A.; Tsui, C., 1982. A new method for assembly line balancing having stochastic work elements. *Computers and Industrial Engineering* 6, 131-148.
22. Reeve, N. R.; Thomas, W. H., 1973. Balancing stochastic assembly lines. *AIIE Transactions* 5, 223-229.
23. Sarin, S. C.; Erel, E., 1990. Development of cost model for the single-model stochastic assembly line balancing problem. *International Journal of Production Research* 28, 1305-1316.
24. Sarin, S. C.; Erel, E.; Dar-El, E. M., 1999. A methodology for solving single-model, stochastic assembly line balancing problem. *Omega* 27, 525-535.
25. Shin, D.; Min, H., 1991. Uniform assembly line balancing with stochastic task times in just-in-time manufacturing. *International Journal of Operations and Production Management* (11/8), 23-34.
26. Shtub, A., 1984. The effect of incompleteness cost on line balancing with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 22, 235-245.
27. Silverman, F. N.; Carter, J. C., 1986. A cost-based methodology for stochastic line balancing with intermittent line stoppages. *Management Science* 32, 455-463.
28. Sniedovich, M., 1981. Analysis of a preference order assembly line problem. *Management Science* 27, 1067-1080.
29. Sotskov, Y.; Dolgui, A.; Portmann, M.-C., 2006. Stability analysis of optimal balance for assembly line with fixed cycle time. *European Journal of Operational Research* 168, 783-797.
30. Sphicas, G. P.; Silverman, F. N., 1976. Deterministic equivalents for stochastic assembly line balancing. *AIIE Transactions* 8, 280-282.
31. Suresh, G.; Sahu, S., 1994. Stochastic assembly line balancing using simulated annealing. *International Journal of Production Research* 32, 1801-1810.
32. Suresh, G.; Vinod, V. V.; Sahu, S., 1996. Genetic algorithm for assembly line balancing. *Production Planning and Control* 7, 38-46.
33. Tsujimura, Y.; Gen, M.; Kubota, E., 1995. Solving fuzzy assembly line balancing problem with genetic algorithms. *Computers and Industrial Engineering* 29, 543-547.
34. Urban, T. L.; Chiang, W.-C., 2006a. An optimal piecewise-linear optimization of the U-line balancing problem with stochastic task times. *European Journal of Operational Research* 168, 771-782.
35. Urban, T. L.; Chiang, W.-C., 2006b. Balancing unpaced synchronous production lines, Working Paper, University of Tulsa, Oklahoma, USA.
36. Van Hop, N., 2006. A heuristic solution for fuzzy mixed-model line balancing problem. *European Journal of Operational Research* 168, 789-810.
37. Wilson, J. M., 1986. Formulation of a problem involving assembly lines with multiple manning of work stations. *International Journal of Production Research* 24, 59-63.

Apéndice A9: Referencias sobre tiempos de tarea dinámicos

1. Boucher, T. O., 1987. Choice of assembly line design under task learning. *International Journal of Production Research* 25, 513-524.
2. Chakravarty, A. K., 1988. Line balancing with task learning effects. *IIE Transactions* 20, 186-193.
3. Chakravarty, A. K.; Shtub, A., 1986. Dynamic manning of long cycle assembly lines with learning effect. *IIE Transactions* 18, 392-397.
4. Cohen, Y.; Dar-El, E. M., 1998. Optimizing the number of stations in assembly lines under learning for limited production. *Production Planning and Control* 9, 230-240.
5. Cohen, Y.; Dar-El, E. M.; Vitner, G.; Sarin, S. C., 2008. Optimal layout and work allocation in batch assembly under learning effect. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications* 4, (1/2) 188-207.
6. Cohen, Y.; Vitner, G.; Sarin, S. C., 2006. Optimal allocation of work in assembly lines for lots with homogenous learning. *European Journal of Operational Research* 168, 922-931.

7. Darl-El, E. M.; Rabinovitch, M., 1988. Optimal planning and scheduling of assembly lines. *International Journal of Production Research* 26, 1433-1450.
8. Dar-El, E. M.; Rubinovitz, J., 1991. Using learning theory in assembly lines for new products. *International Journal of Production Economics* 25, 103-109.
9. Finch, B.; Luebbe, R., 1995. The impact of learning rate and constraints on production line performance. *International Journal of Production Research* 33, 631-642.
10. Globerson, S.; Tamir, A., 1980. The relationship between job design, human behaviour and system response. *International Journal of Production Research* 18, 391-400.
11. Inman, R.; Jordan, W.; Blumenfeld, D., 2004. Chained cross-training of assembly line workers. *International Journal of Production Research* 42, 1899-1910.
12. Karini, R.; Herer, Y. T., 1995. Allocation of tasks to stations in small-batch assembly with learning: basic concepts. *International Journal of Production Research* 33, 2973-2998.
13. McCreery, J. K.; Krajewski, L. J., 1999. Improving performance using workforce flexibility in an assembly environment with learning and forgetting effects. *International Journal of Production Research* 37 (9), 2031-2058.
14. McCreery, J. K.; Krajewski, L.J.; Leong, G.K.; Ward, P.T., 2004. Performance implications of assembly work teams. *Journal of Operations Management* 22, 387-412.
15. Shafer, S. M.; Nembhard, D. A.; Uzumeri, M. V., 2001. The effects of worker learning, forgetting, and heterogeneity on assembly line productivity. *Management Science* 47 (12), 1639-1653.
16. Thomopoulos, N.T.; Lehman, M., 1969. The mixed model learning curve. *IIE Transactions* 1, 127-132.

Apéndice A10: Referencias sobre restricciones de asignación de tareas

1. Agnetis, A.; Ciancimino, A.; Lucertini, M.; Pizzichella, M., 1995. Balancing flexible lines for car components assembly. *International Journal of Production Research* 33, 333-350.
2. Agrawal, P. K., 1985. The related activity concept in assembly line balancing. *International Journal of Production Research* 23, 403-421.
3. Bukchin, J.; Tzur, M., 2000. Design of flexible assembly line to minimize equipment cost. *IIE Transactions* 32, 585-598.
4. Buxey, G. M.; Sadjadi, D., 1976. Simulation studies of conveyor-paced assembly lines with buffer capacity. *International Journal of Production Research* 14, 607-624.
5. Deckro, R. F., 1989. Balancing cycle time and workstations. *IIE Transactions* 21, 106-111.
6. Ignall, E. J., 1965. A review of assembly line balancing. *Journal of Industrial Engineering* 16, 244-254.
7. Iskander, W. H.; Chou, J., 1990. Unbalanced production line scheduling with partial job specialization. *Naval Research Logistics* 37, 789-805.
8. Kilbridge, M. D.; Wester, L., 1961. The balance delay problem. *Management Science* 8, 69-84.
9. Wang, F.; Wilson, R. C., 1986. Comparative analysis of fixed and removable item mixed model assembly lines. *IIE Transactions* 18, 313-317.

Apéndice A11: Referencias sobre réplica de líneas, estaciones o tareas

1. Ahmadi, R. H.; Dasu, S.; Tang, C. S., 1992. The dynamic line allocation problem. *Management Science* 38, 1341-1353.
2. Arcus, A. L., 1966. COMSOAL: A computer method of sequencing operations for assembly lines. *International Journal of Production Research* 4, 259-277.
3. Bard, J. F., 1989. Assembly line balancing with parallel workstations and dead time. *International Journal of Production Research* 27, 1005-1018.
4. Buxey, G. M., 1974. Assembly line balancing with multiple stations. *Management Science* 20, 1010-1021.
5. Daganzo, C. F.; Blumenfeld, D. E., 1994. Assembly system design principles and tradeoffs. *International Journal of Production Research* 32, 669-681.
6. Freeman, D. R.; Jucker, J. V., 1967. The line balancing problem. *Journal of Industrial Engineering* 18, 361-364.
7. Geoffrion, A. M.; Graves, G. W., 1976. Scheduling parallel production lines with changeover costs: practical application of a quadratic assignment/LP approach. *Operations Research* 24, 595-610.
8. Globerson, S.; Tamir, A., 1980. The relationship between job design, human behavior and system response. *International Journal of Production Research* 18, 391-400.
9. Inman, R. R.; Leon, M., 1994. Scheduling duplicate serial stations in transfer lines. *International Journal of Production Research* 32, 2631-2644.

10. Lehman, M., 1969. On criteria for assigning models to assembly lines. *International Journal of Production Research* 7, 269-285.
11. Pinto, P. A.; Dannenbring, D. G.; Khumawala, B. M., 1975. A branch-and-bound algorithm for assembly line balancing with paralleling. *International Journal of Production Research* 13, 183-196.
12. Pinto, P. A.; Dannenbring, D. G.; Khumawala, B. M., 1981. Branch-and-bound and heuristic procedures for assembly line balancing with paralleling of stations. *International Journal of Production Research* 19, 565-576.
13. Sarker, B. R.; Shantikumar, J. G., 1983. A generalized approach for serial or parallel line balancing. *International Journal of Production Research* 21, 109-133.

Apéndice A12: Referencias sobre almacenes intermedios de producto en curso

1. Baker, K. R.; Powell, S. G.; Pyke, D. F., 1990. Buffered and unbuffered assembly systems with variable processing times. *Journal of Manufacturing and Operations Management* 3, 200-223.
2. Buzacott, J. A., 1968. Prediction of the efficiency of production systems without internal storage. *International Journal of Production Research* 6, 173-188.
3. Dolgui, A.; Ereemev, A.; Kolokolov, A.; Sigaev, V., 2002a. A genetic algorithm for allocation of buffer storage capacities in production line with unreliable machines. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 1, 89-104.
4. Hillier, F. S.; So, K. C., 1991. The effect of machine breakdowns and interstage storage on the performance of production line systems. *International Journal of Production Research* 29, 2043-2055.
5. Hillier, F. S.; So, K. C., 1993. Some data for applying the bowl phenomenon to large production line systems. *International Journal of Production Research* 31, 811-822.
6. Malakooti, B., 1994. Assembly line balancing with buffers by multiple criteria optimization. *International Journal of Production Research* 32, 2159-2178.
7. Powell, S. G., 1994. Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines. *International Journal of Production Research* 32, 2201-2217.
8. Suhail, A., 1983. Reliability and optimization considerations in a conveyor-paced assembly line system. *International Journal of Production Research* 21, 627-640.

Apéndice A13: Referencias sobre factores humanos y líneas de montaje

1. Bird, H. A.; Hill, J., 1992. Repetitive strain disorder: towards diagnostic criteria. *Annals of Rheumatoid Diseases* 51 (8), 974-977.
2. Börsch-Supan, Axel; Düzgün, Ismail; Weiss, Matthias. Age and productivity in work teams: evidence from the assembly line.
3. Corominas, A.; Pastor, R.; Plans, J., 2008. Balancing assembly line with skilled and unskilled workers. *Omega* 36, 1126-1132.
4. Eklund, J. A. E., 1995. Relationships between ergonomics and quality in assembly work. *Applied Ergonomics* 26 (1), 15-20.
5. Feng, Y.; Grooten, W.; Wretenberg, P.; Arborelius, U.P., 1999. Effects of arm suspension in simulated assembly line work: muscular activity and posture angles. *Applied Ergonomics* 30, 247-253.
6. Fransson-Hall, C.; Bystrom, S.; Kilbom, A., 1996. Characteristics of forearm-hand exposure in relation to symptoms among automobile assembly line workers. *American Journal of Industrial Medicine* 29, 15-22.
7. Hagberg, M.; Silverstein, B.; Wells, R.; Smith, M. J.; Hendrick, H. W.; Carayon, P.; Perusse, M., 1995. Work related musculoskeletal disorders: a reference book for prevention, Taylor and Francis, New York.
8. Rodgers, S. H., 1987. Recovery time needs for repetitive work. *Seminars in Occupational Medicine* 2 (1), 19-24.
9. Woods, D.; Fisher, D. L.; Andres, R. O., 1997. Minimizing fatigue during repetitive jobs: optimal work rest schedules. *Human Factors* 39 (1), 83-101.

Apéndice A14: Referencias sobre desensamblaje de productos.

1. Addouche, S.; Perrard, C.; Henrioud, J. M., 2002. Linear programming model to find the optimal disassembly sequence. In: *Proceedings of the 3rd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, Italy.

2. Addouche, S.; Perrard, C.; Henrioud, J. M., 2003. Integration of reassembly tasks in disassembly process planning. Preprints of IFAC International Workshop on Intelligent Assembly and Disassembly, Bucharest, Romania.
3. Ansems, A. M. M.; Fugger, E.; Scheidt, L.-G., 1994. Automation of disassembly processes of consumer goods. Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, San Francisco, CA, May 2-4.
4. Chevron, D., 1999. Contribution to study the supervision of a disassembly cell for end-of-life products, Doctoral Thesis, University of Grenoble, November 1999.
5. de Ron, A.; Penev, K., 1995. Disassembly and recycling of electronic consumer products: an overview. *Technovation*, 15 (6), 363-374.
6. Duta, L., 2004. Automatic disassembly systems control. Proceedings of the Annual Romanian Academy Congress, ARA29, Bochum, Germany.
7. Duta, L.; Filip, F. Gh.; Henrioud, J. M., 2003. A method for dealing with the multi-objective optimization problem of disassembly processes. In: Proceedings of the IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning ISATP 2003, Besançon, France.
8. Gungor, A.; Gupta, S. M., 1999. A systematic solution approach to the disassembly line balancing problem. Proceedings of the 25th International Conference on Computers and Industrial Engineering.
9. Gungor, A.; Gupta, S. M., 1999. Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey. *Computers and Industrial Engineering* 36, 811-853.
10. Gungor, A.; Gupta, S. M., 2000. Disassembly sequence plan generation using a branch and bound algorithm. *International Journal of Production Research*. (in press)
11. Gungor, A.; Gupta, S. M., 2001. A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. *International Journal of Production and Research* 39 (7), 1427-1467.
12. Gupta, S. M.; Taleb, K. N., 1994. Scheduling disassembly. *International Journal of Production Research* 32 (8), 1857-1866.
13. Kizilkaya, E. A.; Gupta, S. M., 1998. Material flow control and scheduling in a disassembly environment. *Computers and Industrial Engineering* 35(1-2), 93-96.
14. Kochan, A., 1995. In search of a disassembly factory. *Assembly Automation*, 15 (4), 16-17.
15. Kopacek, P.; Kronreif, G., 1996. Semi-automated robotized disassembling of personal computers. IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Nov. 18-21, Kauai, Hawaii, 567-572.
16. Lambert, A. J. D., 2003. Disassembly sequencing: a survey. *International Journal of Production Research* 41 (16), 3721-3759.
17. Menrad, W.; Grieger, S.; Schlogl, M., 1999. Aspects of industrial recycling of electr(on)ic appliances. Proceedings of the Second International Working Seminar on Re-Use, Eindhoven, The Netherlands, March 1-3, 81-90.
18. Moore, K. E.; Gungor, A.; Gupta, S. M., 1998. Disassembly Petri net generation in the presence of XOR precedence relationships. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, La Jolla, California, 13-18.
19. Moore, K.; Gungor, A.; Gupta, S. M., 1998. Disassembly process planning using Petri nets. In: Proceedings of the IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, San Diego, California.
20. Navin-Chandra, D., 1994. The recovery problem in product design. *Journal of Engineering Design*, 5(1), 65-86.
21. Penev, K. D.; de Ron, A. J., 1994. Development of disassembly line for refrigerators. *Industrial Engineering*, 50-53.
22. Penev, K. D.; de Ron, A. J., 1996. Determination of a disassembly strategy. *International Journal of Production Research* 34 (2), 495-506.
23. Salomonski, N.; Zussman, E., 1999. On-line predictive model for disassembly process planning adaptation. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 15, 211-220.
24. Tani, K.; Güner, E., 1997. Concept of an autonomous disassembly system using behavior-based robotics. *Advanced Robotics* 11 (2), 187-198.
25. Touzane, F., 2002. Contribution to a disassembly system design for the end-of-life products, Doctoral Thesis, Franche-Comté University, Besançon, France.
26. Umeda, K.; Arai, T., 1997. Three-dimensional vision system for mechanical assembly / disassembly. *Advanced Robotics* 11(2), 147-167.
27. Wiendahl, H.-P.; Bürkner, S., 1999. Planning and control in disassembly: the key to an increased profitability. Proceedings of the Second International Working Seminar on Re-Use, Eindhoven, The Netherlands, March 1-3, 247-256.

28. Wiendahl, H.-P.; Lorenz, B.; Bürkner, S., 1998. The necessity for flexible and modular structures in hybrid disassembly processes. *Production Engineering*, 5, 71-76.
29. Wiendahl, H. P.; Selinger, G.; Burkner, S., 1999. A general approach to disassembly planning and control. *Production Planning and Control* vol 10, No. 718.
30. Zussman, E.; Zhou, M., 1999. A methodology for modeling an adaptive planning of disassembly processes. *IEEE Transactions on Robotics and Automations*, vol. 15, No. 1.

Apéndice A15: Referencias sobre datos de placas de circuito impreso.

1. Ammons, J. C.; Carlyle, M.; Cranmer, L.; DePuy, G.; Ellis, K. ; McGinnis, L. F. ; Tovey, C. A. ; Xu, H., 1997. Component allocation to balance workload in PCC assembly systems. *IIE Transactions* 29, 265-275.
2. Croci, F.; Perono, M.; Pozzetti, A., 2000. PCB assembly scheduling through kit concept. *Production Planning and Control* 11 (2), 141-152.
3. Ellis, K. P.; Kobza, J. E.; Vittes, F. J., 2002. Development of a placement time estimator function for a turret style surface mounting placement machine. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* 18, 241-254.
4. Grunow, M.; Günther, H.-O.; Schleusener, M.; Yilmaz, I. O., 2004. Operations planning for collect-and-place machines in printed circuit board assembly. *Computers and Industrial Engineering* 47, 409-429.
5. Günther, H.-O.; Gronalt, M.; Piller, F., 1996. Component kitting in semi-automated PCB assembly. *International Journal of Production Economics* 43, 213-226.
6. Hillier, M. S.; Brandeau, M. L., 2001. Cost minimization and workload balancing in PCB assembly. *IIE Transactions* 33, 547-557.
7. Kazaz, B.; Altinkemer, K., 2003. Optimization of multi-feeder (depot) PCB manufacturing with error guarantees. *European Journal of Operational Research* 150, 370-394.
8. Khoo, L. P.; Ng, T. K., 1998. A GA-based planning system for PCB component placement. *International Journal of Production Economics* 54, 321-332.
9. Kulak, O.; Yilmaz, I. O.; Günther, H.-O., 2008. A GA-based solution approach for balancing PCB assembly lines. *OR Spectrum* 30, 469-491.
10. Leon, V. J.; Peters, B. A., 1998. A comparison of setup strategies for PCB assembly. *Computers and Industrial Engineering* 34 (1), 219-234.
11. Li, S.; Hu, C.; Tian, F., 2008. Enhancing optimal feeder assignment of the multi-head surface mounting machine using genetic algorithms. *Applied Soft Computing* 8, 522-529.
12. Neammanee, P.; Randhawa, S. U., 2003. Integrated methodology for board assignment and component allocation in printed circuit board assembly. *International Journal of Production Research* 41 (5), 919-937.
13. Ong, N.-S.; Tan, W.-C., 2002. Sequence placement planning for high-speed PCB assembly machine. *Integrated Manufacturing Systems* 13 (1), 35-46.
14. Sutherland, I. E.; Oestreicher, D., 1973. How big should a printed circuit board be? *IEEE Transactions on Computers* (May), 537-542.
15. Wang, C.; Ho, L.-S.; Cannon, D. J., 1998. Heuristics for assembly sequencing and relative magazine assignment for robotic assembly. *Computers and Industrial Engineering* 34 (2), 423-431.
16. Wu, Y.; Ji, P.; Ho, W., 2009. Optimizing PCB assembly for family setup strategy. *Assembly Automation* 29 (1), 61-67.